

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO
CIVIL – PPGECC

JANDERSON WILLIAM RAISDORFER

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS
AO CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA CARBONATAÇÃO, ABSORÇÃO
CAPILAR E RESISTIVIDADE DE CONCRETOS

CURITIBA

2015

JANDERSON WILLIAM RAISDORFER

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS
AO CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA CARBONATAÇÃO, ABSORÇÃO
CAPILAR E RESISTIVIDADE DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho

CURITIBA

2015

R154i Raisdorfer, Janderson William
Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland : efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos/ Janderson William Raisdorfer. – Curitiba, 2015.
151 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros – Co-orientador: Juarez Hoppe Filho.
Bibliografia: p. 127-135.

1. Materiais pozolânicos. 2. Água - Absorção. 3. Dióxido de carbono - Reações químicas. 4. Equilíbrio ácido-base. 5. Resistência elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. III. Hoppe Filho, Juarez. IV. Título.

CDD: 666.94

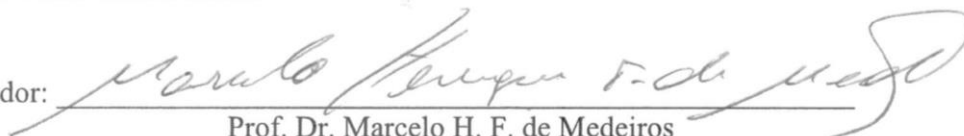
TERMO DE APROVAÇÃO

JANDERSON WILLIAM RAISDORFER

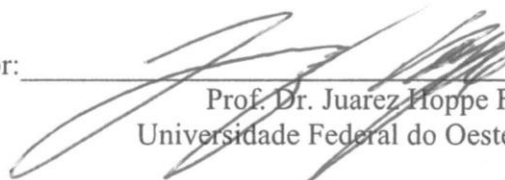
**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS
AO CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA CARBONATAÇÃO, ABSORÇÃO
CAPILAR E RESISTIVIDADE DE CONCRETOS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração: Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

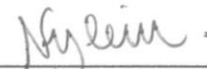
Orientador:


Prof. Dr. Marcelo H. F. de Medeiros
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil - UFPR

Co-orientador:


Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Examinador:


Prof.ª Dr.ª Nayara Soares Klein
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil - UFPR

Examinador:


Prof. Dr. Ronaldo A. de Medeiros Junior
Programa de Engenharia de Infraestrutura Aeronáuticas do ITA

Curitiba, 21 de maio de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos do PPGECC que sempre estão me apoiando e compartilhando os conhecimentos adquiridos durante o curso, especialmente a Ligia Vitória Real pela parceria nos trabalhos de laboratórios, à Carolina Londero e Giovana Réus pela ajuda nas correções. Ao aluno de iniciação científica Pedro Baggio pela ajuda nos ensaios deste trabalho e ao amigo Alan Cesar Polucha pela ajuda nos ensaios.

Ao professor Dr. Marcelo Henrique Faria de Medeiros, que além de professor, é um grande amigo, que me incentiva, auxilia e me orienta no desenvolvimento deste trabalho. Uma pessoa que levarei como um exemplo por toda minha vida. Ao professor Dr. Juarez Hoppe Filho, pela grande ajuda na reta final deste trabalho.

Ao meu Pai Bernardino Raisdorfer, ao meu irmão Maichel Fernando Raisdorfer e especialmente a minha Mãe Arlete Bencke, que me deram o suporte necessário para chegar até este momento.

Aos meus amigos, em especial Mario Eduardo Scoparo e Souza, que sempre me apoiou em todas as ocasiões. À minha namorada Paula Marjorie Malinoski de Oliveira que sempre incentivou meus estudos.

Por fim a Deus.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Arlete Bencke, pois sem a presença dessa grande lutadora em minha vida, nada disso seria possível.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos** – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido para avaliar a influência da adição e da substituição parcial de adições minerais ao cimento Portland. Desse modo, foram executados corpos de prova de concreto com adições minerais que neste caso foram: cinza volante, sílica ativa, sílica de casca de arroz, fíler de quartzo e metacaulim. Esses materiais foram utilizados de dois modos diferentes, adicionados à quantidade de cimento, para verificar a relação do consumo do hidróxido de cálcio, e por substituição parcial do cimento, avaliando o efeito cumulativo do consumo do hidróxido de cálcio pelo efeito pozolânico, juntamente com a redução da reserva alcalina proporcionada pela substituição parcial de cimento. Também foi avaliado o consumo de hidróxido de cálcio para as pozolanas de alta reatividade como a sílica ativa, a sílica de casca de arroz e o metacaulim. O fíler de quartzo foi utilizado para avaliar o efeito de uma adição inerte, sem atividade pozolânica. A cinza volante, adição mineral utilizada em grande quantidade nos cimentos comerciais, foi aplicada em dois teores diferentes, a adição de 10% foi empregada a fim de simular o comportamento do cimento CPM II Z e a adição de 30% simula o cimento CP IV. Os concretos executados foram colocados em uma câmara climatizada com 40°C, 60% de umidade relativa e 5% de CO₂, acelerando o processo de carbonatação para encontrar leituras significativas da profundidade da frente de carbonatação nas idades de 1, 4, 8 e 12 semanas. Subsequentemente foram estimados os coeficientes de carbonatação e correlacionados com o consumo de hidróxido de cálcio teórico do sistema. Na maioria dos casos estudados neste trabalho, a utilização de adições minerais com potencial pozolânico reduziu à resistência à carbonatação dos concretos. Isso ocorreu mesmo nos concretos que tiveram a absorção capilar reduzida. Para todas as adições dos casos estudados, a resistividade elétrica aumentou, provavelmente pela redução de portlandita na rede de poros e pelo efeito do refinamento dos poros do concreto. Os dados da adição de metacaulim e sílica ativa indicaram que a reserva alcalina não é o único preponderante no avanço da frente de carbonatação. Embora a carbonatação tenha sido facilitada pela redução do hidróxido de cálcio, a resistividade elétrica encontrada foi muito mais elevada em relação ao traço de referência, indicando que, quando no concreto com adição pozolânica (maior resistividade elétrica) ocorrer a despassivação das armaduras, a velocidade de corrosão desenvolvida será mais lenta em comparação à série de referência (sem adição pozolânica).

Palavras-chave: Atividade pozolânica, absorção de água; carbonatação acelerada; reserva alcalina; resistividade elétrica.

RAISDORFER, J. W. **Influence of the addition or replacement of Portland cement mineral additions to: effects on carbonation capillary absorption and resistivity of concrete.** Master's thesis, Federal University of Paraná, 2015.

ABSTRACT

This work was developed to evaluate the influence of the addition and the partial substitution of mineral additions to Portland cement. They have been performed concrete with mineral admixtures in this case were: fly ash, silica fume, rice husk silica, quartz fillers and metakaolin. These materials were used in two different modes, added to the amount of cement, to verify the relationship of calcium hydroxide consumption, and partial replacement of cement, assessing the cumulative effect of calcium hydroxide consumption by pozzolanic effect, together with reducing the alkalinity provided by the partial replacement of cement. It was also evaluated the consumption of calcium hydroxide to the high reactivity pozzolans such as silica fume, rice husk silica and metakaolin. The quartz fillers were used to evaluate the effect of inert addition, without pozzolanic activity. Fly ash, mineral admixture used in large quantities in commercial cement was applied at two different levels, 10% variation was used to simulate the behavior of cement CII Z and 30% variation simulates the cement CP IV. The concretes were placed in a chamber at 40 ° C, 60% relative humidity and 5% CO₂, speeding up the carbonation process to find meaningful readings of the depth of carbonation at ages of 1, 4, 8 and 12 weeks. Subsequently carbonation were estimated coefficients and correlated with the consumption of the theoretical calcium hydroxide system. In most cases studied in this work, the use of mineral additions with potential pozzolanic reduced resistance to carbonation of concrete. This occurred even in the concrete that had reduced capillary absorption. For all additions of the cases studied, the electrical resistivity increased, probably due to reduction of calcium hydroxide in the network of pores and the effect of refinement of the concrete pores. The addition of metakaolin and silica fume indicate that the alkaline reserve is not the predominant one in the advancement of carbonation. While carbonation has been facilitated by the reduction of calcium hydroxide, the found resistivity was much higher compared to reference, indicates that when the concrete with pozzolanic addition (higher resistivity) occur depassivation reinforcement, corrosion rate developed will be slower compared to reference (pozzolanic without addition).

Keywords: Pozzolanic activity, water absorption; accelerated carbonation; alkaline reserve, electrical resistivity

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO.....	17
1.2	HIPÓTESE.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ADIÇÕES MINERAIS	21
2.1.1	<i>Metacaulim</i>	25
2.1.2	<i>Sílica ativa</i>	27
2.1.3	<i>Sílica de Casca de Arroz</i>	28
2.1.4	<i>Cinza Volante</i>	30
2.1.5	<i>Fíler quartzoso</i>	31
2.2	CARBONATAÇÃO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND.....	32
2.3	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO	35
2.3.1	<i>Difusão</i>	36
2.3.2	<i>Permeabilidade</i>	36
2.3.3	<i>Absorção Capilar</i>	38
2.3.4	<i>Resistividade Elétrica</i>	40
2.4	CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	41
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.1	MATERIAIS	47
3.1.1	<i>Agregados</i>	47
3.1.2	<i>Aditivo</i>	48
3.1.3	<i>Aglomerantes</i>	49
3.2	PROPORÇÃO DE MISTURA DOS CONCRETOS	57
3.3	ENSAIOS REALIZADOS	64
3.3.1	<i>Carbonatação acelerada</i>	64
3.3.2	<i>Profundidade de carbonatação determinada por indicadores químicos</i>	66
3.3.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	69
3.3.4	<i>Resistividade elétrica</i>	71
3.3.5	<i>Difratometria de raios-X (DRX)</i>	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1	RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO	75
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS	79
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCCÃO CAPILAR	82

4.4	VOLUME DE PASTA E QUANTIDADE TEÓRICA DE PORTLANDITA NOS CONCRETOS	86
4.5	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX).....	88
4.6	RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	93
4.6.1	<i>Metacaulim</i>	97
4.6.2	<i>Sílica ativa</i>	98
4.6.3	<i>Sílica de casca de Arroz</i>	100
4.6.4	<i>Cinza volante</i>	100
4.6.5	<i>Fíler Quartzoso</i>	102
4.7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	103
4.7.1	<i>Velocidade de carbonatação para adições de alta reatividade</i>	103
4.7.1.1	Metacaulim.....	103
4.7.1.2	Sílica ativa.....	105
4.7.1.3	Sílica de casca de Arroz	106
4.7.2	<i>Velocidade de carbonatação para adições de baixa reatividade</i>	108
4.7.2.1	Cinza volante.....	108
4.7.2.2	Fíler Quartzoso.....	110
4.7.3	<i>Relação entre os resultados dos ensaios</i>	111
4.7.3.1	Efeito da resistência à compressão, absorção capilar e resistividade elétrica no KCO2 :	111
4.7.3.2	Comparações entre a resistividade elétrica, resistência à compressão e absorção de água: ...	115
4.7.3.3	Tentativa de estabelecer um índice de relação com a velocidade de carbonatação:	118
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.1	CONCLUSÕES	123
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
5.3	ATUAÇÃO EM PUBLICAÇÕES:	126
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
7	ANEXOS.....	136
7.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	136
7.2	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO GERAL.....	136
7.3	RESISTIVIDADE ELÉTRICA GERAL.....	137
7.4	ABSORÇÃO CAPILAR GERAL	138
7.4.1	<i>Ensaio de absorção capilar</i>	139
7.5	TESTE TUKEY	146

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – QUANTIDADE DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO LIBERADO, NA BASE DE NÃO VOLÁTEIS, PELO CIMENTO CP V - ARI MOLDADO NA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO = 0,45. ADAPTADO DE HOPPE FILHO (2008)...	22
FIGURA 2 – PICO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X RELATIVO À PORTLANDITA REMANESCENTE NOS DIFERENTES SISTEMAS DE CAL E ADIÇÕES MINERAIS, APÓS 7 DIAS DE CURA TÉRMICA, CONFORME RECOMENDAÇÃO DA NBR 5751/2012 (GOBBI, 2014).	24
FIGURA 3 - ESTRUTURA CRISTALINA DA ARGILA CAULÍNICA (GRIM, 1962 APUD SOUZA, 2003).....	26
FIGURA 4 – VARIAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE SÍLICA ATIVA EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA COM FORMAÇÃO DE CRISTAIS NA SUPERFÍCIE (ROMANO <i>ET AL.</i> , 2008).	28
FIGURA 5 – MORFOLOGIA DA CASCA DE ARROZ (A) E CINZA DE CASCA DE ARROZ (B) (DELLA <i>ET AL.</i> , 2006).	29
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA HIPÓTESE QUE EXPLICA A MELHORA DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PARA ADIÇÕES INERTES (HOPPE FILHO, 2008 ADAPTADO DE LAWRENCE <i>ET AL.</i> , 2003).	32
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE CARBONATAÇÃO (HOPPE FILHO, 2008 ADAPTADO DE MEDEIROS & HELENE 2001).	33
FIGURA 8 – ESQUEMA DA CONEXÃO ENTRE OS POROS. ADAPTADO DE HELENE (1993)	37
FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE A PERMEABILIDADE E A RELAÇÃO A/C EM PASTAS DE CIMENTO COM GRAU DE HIDRATAÇÃO DE 93% (POWERS <i>ET AL.</i> 1954, ADAPTADO DE NEVILLE, 2013).	38
FIGURA 10 – ESQUEMA DE CAPILARIDADE PARA DIÂMETRO PEQUENO, MÉDIO E GRANDE. QUANTO MENOR FOR O DIÂMETRO CAPILAR, MAIOR SERÁ A FORÇA DE ABSORÇÃO CAPILAR.	39
FIGURA 11 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DE CONCRETOS COM CP-V ARI E RELAÇÕES A/C DE 0,40 – 0,50 – 0,57 – 0,65 (MAX <i>ET AL.</i> , 2007).	40
FIGURA 12 – INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO ENTRE RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE E TEOR DE SÍLICA ATIVA NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO (POSSAN, 2004).	43
FIGURA 13 – UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE X GRAU DE CARBONATAÇÃO (ROSEMBERG <i>ET AL.</i> 1989 APUD CASCUDO 1997 ADAPTADO DE HELENE, 1993).	44
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO, CONFORME ABNT NBR 7211(2009).	47
FIGURA 15 – GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO, CONFORME ABNT NBR 7211 (2009).	48
FIGURA 16 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO CIMENTO CP V – ARI ANIDRO	49
FIGURA 17 – GRANULOMETRIA A LASER DOS AGLOMERANTES	51
FIGURA 18 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE METACAULIM.	52
FIGURA 19 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO METACAULIM.	53
FIGURA 20 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE SÍLICA ATIVA.	53
FIGURA 21- ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA SÍLICA ATIVA.	54
FIGURA 22 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ.	54
FIGURA 23 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA SÍLICA DA CASCA DE ARROZ.	55
FIGURA 24 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE CINZA VOLANTE	56
FIGURA 25 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE FÍLER QUARTZOSO.	56
FIGURA 26 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO FÍLER QUARTZOSO	57
FIGURA 27 – ESQUEMA DE APRESENTAÇÃO DE ADIÇÃO E SUBSTITUIÇÃO.	58
FIGURA 28 – VARIAÇÃO DO VOLUME DE AGLOMERANTE EM FUNÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA ADIÇÃO MINERAL.	61
FIGURA 29 – VARIAÇÃO DO VOLUME DE CIMENTO E DO VOLUME DE ADIÇÃO.	62
FIGURA 30 – FLUXO GRAMA DO TRABALHO	63
FIGURA 31 – CÂMARA DE CARBONATAÇÃO DO LABORATÓRIO LAME/DCC DA UFPR.	65
FIGURA 32 – PRINCIPAIS INDICADORES DE PH USADOS NO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO ADAPTADO DE CASTRO (2003).	66
FIGURA 33 – ESQUEMA DE LEITURA DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.	67
FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA E O TEMPO REAL.	68
FIGURA 35 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO LINEARIZADA.	68
FIGURA 36 – ABSORÇÃO CAPILAR	70
FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO DO COEFICIENTE DE SORVIDADE E ABSORÇÃO INICIAL.	71
FIGURA 38 – ESQUEMA DO CAMPO MAGNÉTICO DENTRO DO CONCRETO (MANUAL PROCEQ).	72
FIGURA 39 - AMOSTRAS NO PORTA AMOSTRA DE ALUMÍNIO (GOBBI, 2014).....	73

FIGURA 40 – DRX DA AMOSTRA DE ARGAMASSA DO CONCRETO DE REFERÊNCIA.....	74
FIGURA 41 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO AO LONGO DO TEMPO PARA O TRAÇO DE REFERÊNCIA. 75	
FIGURA 42 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO DOS CONCRETOS ESTUDADOS, A ESQUERDA SUBSTITUIÇÃO E A DIREITA ADIÇÃO.....	77
FIGURA 43 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA TODAS AS SUBSTITUIÇÕES.....	78
FIGURA 44 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA TODAS AS ADIÇÕES.	79
FIGURA 45 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS.	80
FIGURA 46 – TESTE TUKEY DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS PARTE 1/03.	81
FIGURA 47 - TESTE TUKEY DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS PARTE 2/3.	81
FIGURA 48 – TESTE TUKEY DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS PARTE 3/3.	82
FIGURA 49 – COEFICIENTE DE SORVIDADE DOS CONCRETOS ESTUDADOS.....	83
FIGURA 50 – TESTE TUKEY DA ABSORÇÃO CAPILAR COM 72H DE ENSAIO PARTE 01/03.	84
FIGURA 51 - TESTE TUKEY DA ABSORÇÃO CAPILAR COM 72H DE ENSAIO PARTE 02/03.....	84
FIGURA 52 - TESTE TUKEY DA ABSORÇÃO CAPILAR COM 72H DE ENSAIO PARTE 03/03.....	85
FIGURA 53 – MASSA TEÓRICA DE PORTLANDITA EM KG/M ³ DE CONCRETO, ALÉM DAS PORCENTAGENS TEÓRICAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NA ARGAMASSA SECA DO CONCRETO E NO PRÓPRIO CONCRETO, DESCONSIDERANDO O CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO PELA ATIVIDADE POZOLÂNICA.	86
FIGURA 54 - CÁLCULO DE CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO TEÓRICO, EM VOLUME ABSOLUTO, COM BASE NA CAPACIDADE DE FIXAR CAL DAS ADIÇÕES MINERAIS, DETERMINADA PELO ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO (NBR 15.895/2010), E O TEOR REMANESCENTE NA MATRIZ HIDRATADA DE CADA CONCRETO.	87
FIGURA 55 – CÁLCULO DE CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO TEÓRICO, COM BASE NA CAPACIDADE DETERMINADA PELO ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO (NBR 15.895/2010).....	88
FIGURA 56 – DIFRATOGRAMAS DE TODAS AS AMOSTRAS (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).....	90
FIGURA 57 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE METACULIM (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	91
FIGURA 58 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE SÍLICA ATIVA (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	91
FIGURA 59 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	92
FIGURA 60 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CINZA VOLANTE COM TEOR DE 10% (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	92
FIGURA 61 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CINZA VOLANTE COM TEOR DE 30% (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	93
FIGURA 62 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE FÍLER QUARTZO (PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2 θ).	93
FIGURA 63 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM 8 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO.....	95
FIGURA 64 – TESTE TUKEY DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM 8 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO PARTE 1/3.	96
FIGURA 65 – TESTE TUKEY DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM 8 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO PARTE 2/3.	97
FIGURA 66 – TESTE TUKEY DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM 8 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO PARTE 3/3.	97
FIGURA 67 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COM METACULIM.	98
FIGURA 68 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COM SÍLICA ATIVA.	99
FIGURA 69 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA O CONCRETO COM SÍLICA DE CASCA DE ARROZ.	100
FIGURA 70 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COM CINZA VOLANTE.	101
FIGURA 71 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COM FÍLER QUARTZOSO.....	102
FIGURA 72 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO COM METACULIM.	103
FIGURA 73 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO COM SÍLICA ATIVA.....	105
FIGURA 74 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM SÍLICA DE CASCA DE ARROZ.	107
FIGURA 75 – CARBONATAÇÃO DOS CONCRETOS COM CINZA VOLANTE.	109
FIGURA 76 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO COM FÍLER QUARTZOSO.....	110
FIGURA 77 – RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (KCO2) E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	112
FIGURA 78 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (KCO2) E A ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	113

FIGURA 79 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (KCO2) E A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.	114
FIGURA 80 – RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (KCO2) E A CAL DISPONÍVEL (INDICATIVO DE RESERVA ALCALINA).....	115
FIGURA 81 – RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO (KCO2) E A INTENSIDADE DO PICO PRINCIPAL DA PORTLANDITA, LOCALIZADO NA REGIÃO DE 34,2° 2θ NOS RESPECTIVOS DIFRATOGRAMAS (INDICATIVO DE RESERVA ALCALINA).	115
FIGURA 82 - RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	116
FIGURA 83 - RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.	117
FIGURA 84 - RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	118
FIGURA 85 - RELAÇÃO ENTRE $K_{FC/ABS}$ E K_{CO2}	120
FIGURA 86 - RELAÇÃO ENTRE $K_{FC/(A/C \cdot ABS)}$ E K_{CO2}	121
FIGURA 87 - RELAÇÃO ENTRE $K_{(FC \times RESERVA)/(A/C \cdot ABS)}$ E K_{CO2}	122
FIGURA 89 – ABSORÇÃO CAPILAR REFERÊNCIA.	139
FIGURA 90 - ABSORÇÃO CAPILAR METACAULIN.	140
FIGURA 91 – ABSORÇÃO CAPILAR ADIÇÃO DE METACAULIN.	140
FIGURA 92 – ABSORÇÃO CAPILAR SÍLICA ATIVA SUBSTITUIÇÃO.....	141
FIGURA 93 ABSORÇÃO CAPILAR SÍLICA ATIVA ADIÇÃO.	141
FIGURA 94 – ABSORÇÃO CAPILAR FÍLER QUARTZOSO SUBSTITUIÇÃO.	142
FIGURA 95 – ABSORÇÃO CAPILAR FÍLER QUARTZOSO ADIÇÃO.	142
FIGURA 96 – ABSORÇÃO CAPILAR CINZA DE CASCA DE ARROZ SUBSTITUIÇÃO.....	143
FIGURA 97 – ABSORÇÃO CAPILAR CINZA DE CASCA DE ARROZ ADIÇÃO.	143
FIGURA 98 – ABSORÇÃO CAPILAR SUBSTITUIÇÃO DE 10% DE CINZA VOLANTE.	144
FIGURA 99 – ABSORÇÃO CAPILAR ADIÇÃO DE 10% DE CINZA VOLANTE.....	144
FIGURA 100 – ABSORÇÃO CAPILAR SUBSTITUIÇÃO DE 30% DE CINZA VOLANTE.....	145
FIGURA 101 – ABSORÇÃO CAPILAR ADIÇÃO DE 30% DE CINZA VOLANTE.....	145
FIGURA 102 – TESTE TUKEY GERAL DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AOS 28 DIAS.	146
FIGURA 103 - TESTE TUKEY PARA LEITURAS DE CARBONATAÇÃO À 1 SEMANAS.	147
FIGURA 104 – TESTE TUKEY PARA LEITURAS DE CARBONATAÇÃO À 4 SEMANAS.....	148
FIGURA 105 – TESTE TUKEY PARA LEITURAS DE CARBONATAÇÃO À 8 SEMANAS.....	149
FIGURA 106 – TESTE TUKEY PARA LEITURAS DE CARBONATAÇÃO À 12 SEMANAS.....	150
FIGURA 107 – TESTE TUKEY DA ABSORÇÃO CAPILAR ÀS 72H.	151

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO METACALIM DE ALTA REATIVIDADE (MALHOTRA & METHA, 1996)	26
TABELA 2 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA (CEB – 192 APUD CASCUDO, 1997).	37
TABELA 3 – LEVANTAMENTO DAS CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS EM ENSAIOS ACELERADOS DOS ÚLTIMOS ANOS.	46
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	47
TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO.....	48
TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO PORTLAND CP V – ARI.	49
TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E RESULTADOS DO ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO DAS ADIÇÕES MINERAIS	50
TABELA 8 – RESULTADO DA FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X.	51
TABELA 9 – MINERAIS ENCONTRADOS NO DIFRATOGRAMA DO METACALIM	52
TABELA 10 - MINERAIS ENCONTRADOS NO DIFRATOGRAMA DO SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	54
TABELA 11 - MINERAIS ENCONTRADOS NO DIFRATOGRAMA DO CINZA VOLANTE	56
TABELA 12 – TRAÇOS CONFORME CONFECCIONADOS EM BETONEIRA.	59
TABELA 13 – TRAÇOS RECALCULADOS EM MASSA POR M ³ DE CONCRETO	59
TABELA 14 – TRAÇOS RECALCULADOS EM VOLUME POR M ³ DE CONCRETO	60
TABELA 15 – FLUXOGRAMA DO TRABALHO	63
TABELA 16 – RESUMO DAS VARIÁVEIS QUE ENVOLVEM O ESTUDO.	64
TABELA 19 – MÉDIA DAS LEITURAS DE FENOLFTALEÍNA	136
TABELA 20 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA MEDIA ENCONTRADA EM CADA LEITURA	137
TABELA 21 – MÉDIA DAS LEITURAS DE ABSORÇÃO CAPILAR	138

LISTA DE SIGLAS

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio

CH – Hidróxido de cálcio

CO_2 – Dióxido de carbono, gás carbônico

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CP – Corpo de prova

PVC – Policloreto de polivinila (plástico para tubulação)

SSS – Saturada Superfície Seca

SiO_2 – Dióxido de silício

$^{\circ}\text{C}$ – graus centígrados

mg – miligramas

m_{sat} – massa saturada

m_s – massa seca

K_{CO_2} – Coeficiente de Carbonatação

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, várias adições minerais vêm sendo testadas com o intuito de melhorar propriedades específicas do concreto para uma determinada aplicação, assim como a redução da permeabilidade, ou simplesmente reduzir os custos de produção, desde que sua utilização seja tecnicamente viável. Também há a preocupação em relação à danos ambientais. Geralmente as adições minerais são oriundas de resíduos de processos industriais. Por exemplo, a cinza volante que é retirada das chaminés de fornos movidos a carvão e a sílica de casca de arroz que é um subproduto do processo industrial do beneficiamento do arroz. O resíduo que seria descartado pode ser destinado à indústria cimentícia, sendo vantajoso ambientalmente, visto que assim estes resíduos deixam de ser descartados no meio ambiente.

Na grande maioria dos casos, as adições melhoram as propriedades do material cimentício, dificultando o ingresso de água, reduzindo o calor de hidratação, refinando a estrutura de poros, tornando o concreto mais resistente ao ataque por cloretos, como apresentado por Ampadu *et al.* (1999) e sulfatos como apresentado em Silveira (1996). Enfim, em muitas situações, as adições minerais adaptam o concreto às várias necessidades construtivas. Também alteram a trabalhabilidade do concreto, facilitando seu adensamento e, por consequência, contribuindo para a prolongar a vida útil da estrutura, conforme Neville & Brooks (2010). Há também a redução do pico de calor de hidratação do concreto, dando maior viabilidade às concretagens de grandes volumes, como grandes blocos de fundações e até mesmo barragens (ALVES, 1993).

De modo geral, pode-se considerar que as pozolanas quando utilizadas em quantidades ideais podem contribuir para o melhoramento do empacotamento de partículas e com reações pozolânicas, que refinam a microestrutura do concreto, deixando-o mais resistente a ataques químicos e físicos.

Embora seja verdade que em vários casos as adições pozolânicas têm consequências vantajosas quando associadas ao cimento Portland, é necessário investigar pontos negativos do emprego destas adições minerais, gerando conhecimento a ponto de balizar a possibilidade de utilização ou não destas adições em função das condições de serviço a que a estrutura de concreto armado estará submetida. Desse modo, as adições devem ser avaliadas por todos os ângulos possíveis para que sejam determinadas todas as contribuições e limitações provenientes do seu uso, possibilitando uma visão sistêmica dos efeitos das adições minerais em compósitos de cimento Portland.

O efeito pozolânico ocorre a partir do consumo de hidróxido de cálcio, principal responsável pela alta alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto. Em outras palavras, os concretos com adições minerais pozolânicas tendem a apresentar menor reserva alcalina, assim como apresentado por Papadakis (2000), Siddique e Khan (2011), e isso pode significar maior suscetibilidade ao avanço da frente de carbonatação.

Dentre os materiais estudados nesta pesquisa estão a cinza volante, amplamente utilizada pela indústria cimenteira no país, com agravante que é utilizada em grandes porcentagens de substituição ao cimento. Também são contempladas adições minerais de alta reatividade como a sílica ativa, sílica de casca de arroz e o metacaulim, as quais devem proporcionar melhorias superiores aos cimentos convencionais comercializados no mercado, sendo complementado com a utilização de uma adição mineral inerte como o fíler de quartzo.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito de adições minerais reativas e uma inerte sobre a carbonatação de concretos com diferentes composições de material cimentante. As adições minerais reativas utilizadas são a cinza volante, a sílica de casca de arroz, o metacaulim e a sílica ativa, enquanto o fíler de quartzo será utilizado como material inerte.

A utilização de adições minerais na composição do material ligante foi avaliada sob o ponto de vista da carbonatação acelerada avaliando a condição da substituição ao cimento e a adição à quantidade de aglomerante, a fim de avaliar os efeitos da alteração da reserva alcalina pela alteração na quantidade de cimento.

As diferentes taxas de carbonatação foram avaliadas quando utilizadas adições minerais com potenciais pozolânicos diferentes entre si, verificando a intensidade de cada melhoria, assim como o ganho na resistência à compressão e a redução da absorção capilar, correlacionando com a menor reserva alcalina.

1.2 HIPÓTESE

Dependendo das condições físico-químicas e da adição mineral utilizada, a atividade pozolânica pode consumir uma quantidade expressiva de Ca(OH)_2 , situação que

reduz o pH do concreto, e isso gera uma aceleração no processo de carbonatação, fazendo com que o aço das estruturas de concreto armado entre em um estado de corrosão mais agressivo de maneira precoce (CASCUDO, 1997; HOPPE FILHO, 2008; MALHEIROS *et al.*, 2014).

Tendo em vista a utilização de adições minerais na construção civil, cabe analisar tecnicamente suas vantagens e desvantagens quanto ao ataque por CO₂ nas estruturas, uma vez que o desenvolvimento dos centros urbanos e regiões industrializadas aumentam a emissão desse gás, que não só colabora para mudanças climáticas como também atinge as edificações pelo fenômeno da carbonatação.

Baseado nas afirmações anteriores, a hipótese deste trabalho é que a utilização de adições minerais com diferentes potenciais pozolânicos, embora contribuam para a melhoria das propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido, podem acelerar o fenômeno de carbonatação e, por consequência, reduzir a vida útil das armaduras.

1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo o relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), atualmente cerca de 62% do total de 66,4 milhões de toneladas de cimento produzidos no país no ano de 2013 é do tipo CP II, que segundo a NBR 11.578/1991, para o subtipo Z (pozolânico), pode conter até 14% de pozolana, o que demonstra que o uso deste tipo de adição está sendo amplamente utilizado pela indústria cimentícia, sejam tanto para a execução de concretos como de argamassas. Porém, a avaliação voltada à carbonatação precisa ser mais desenvolvida e focada. Para apresentar uma visão crítica fundamentada em dados experimentais para as diversas adições minerais existentes, tendo em vistas seus potenciais pozolânicos diferenciados.

A construção civil é uma das maiores indústrias consumidoras de recursos naturais. Por consequência, todas as atividades deste setor têm um grande impacto sobre o meio ambiente e, ao mesmo tempo, o cimento tem uma participação considerável neste elevado impacto ambiental, desde a fabricação até sua utilização.

Conforme estatística apresentada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2013), em relação ao setor da indústria, a produção de cimento liberou 22,055 milhões de toneladas de gases estufa em 2010, ou seja 26,9% das emissões de toda a

indústria brasileira, ficando atrás somente da produção de aço. Já conforme o relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, a quantidade de CO₂ liberada devido a produção nacional de cimento no ano de 2013 foi de aproximadamente 42 milhões de toneladas. Estes valores são de todo o seu processo produtivo que envolve a extração do minério de suas respectivas jazidas, transporte para cimenteira, aquecimento à 1.450 °C e, posteriormente, o transporte para o seu destino final. Em todo o processo, da produção à aplicação, há uma grande utilização de energia e consequentemente liberação de CO₂. Logo, a redução do consumo de cimento não tem impacto apenas econômico, mas tem relação direta com a redução da degradação ambiental, aquecimento global e consumo de materiais não renováveis.

A utilização de pozolana e/ou fíler tende a diminuir o volume de clínquer para a execução do concreto, o que faz com que a utilização de adições minerais torne a aplicação do concreto mais sustentável. Além disso, as adições minerais na grande maioria dos casos, são resíduos de algum processo industrial. Sendo assim, evita-se o descarte irregular dessas substâncias e se minimiza as quantidades de extrações minerais para a fabricação do cimento. Conforme Isaia e Gastaldini (2004), a utilização desses materiais podem diminuir em até 5% do custo, 58% do consumo de energia e 81% da emissão de CO₂.

O uso de adições minerais, além de reduzir o consumo de cimento, propicia o refinamento de poros que irá dificultar o transporte de substâncias no interior do concreto, possibilitando uma extensão da vida útil da estrutura e reduzindo custos de manutenção ao longo da sua utilização. Nos Estados Unidos da América, o reparo de 600.000 pontes rodoviárias chegou a 80 bilhões de dólares em 2001 (ESTES & FRANGOPOL, 2001). Portanto, prolongar a vida útil de estruturas de concreto impacta positivamente no dispêndio financeiro para garantir adequada funcionalidade e desempenho da infraestrutura de uma nação. Desta forma, as adições minerais, quando adequadamente utilizadas, assumem grande relevância econômica, já que podem viabilizar recursos a serem utilizados em outras demandas sociais.

Pelo ponto de vista tecnológico, o consumo de cimento tende a ser interpretado como algo intimamente ligado ao desenvolvimento de uma sociedade (SNIC, 2013). No entanto, a redução deste consumo tem grande relevância na atenuação dos impactos ambientais e econômicos. O efeito da carbonatação está relacionado analogamente ao envelhecimento da microestrutura do concreto e, se esta for muito rápida, as armaduras podem começar a se deteriorar de forma mais intensa mesmo que o concreto tenha pouca

idade. Logo, o estudo deste fenômeno está diretamente ligado à responsabilidade social, pois as estruturas de concreto não são usadas apenas por uma geração. Embora projetadas para uma vida útil mínima de 50 anos, estas estruturas são utilizadas por muito mais tempo. Assim como as edificações históricas que duram por séculos, as novas estruturas também terão um envelhecimento ao longo do tempo e as próximas gerações necessitam utilizá-las com segurança. Logo, as atitudes tomadas no momento da sua construção e durante a sua operação podem ajudar na prevenção de riscos futuros e na redução das perdas econômicas geradas para a manutenção da estrutura.

Muitos fatores estão relacionados com a taxa de carbonatação, dentre elas a relação água/cimento, permeabilidade, percentual de argamassa, reserva alcalina e potencial pozolânico da adição mineral utilizada. No caso específico da influência da reserva alcalina, embora existam muitas pesquisas na área, há uma lacuna sobre quais são as condições que a utilização de adições minerais não é apropriada. Quando se utiliza o cimento puro, ou seja, sem o uso de adições minerais, tem-se uma quantidade de reserva alcalina em função da quantidade de cimento. Mas quando há a substituição do cimento por uma adição mineral pozolânica, retira-se parte da reserva alcalina em virtude da inserção de outro material na mistura, além do consumo desta adição por atividade pozolânica.

Dependendo da adição mineral utilizada, assim como demonstrado em Gobbi (2014), esse potencial pozolânico pode ter intensidades diferentes. A sílica ativa, por exemplo, apresenta um alto consumo de hidróxido do cálcio, podendo consumir toda a reserva alcalina, aumentando a taxa de carbonatação, ou de maneira benéfica, colmatando a estrutura porosa em decorrência do efeito pozolânico.

Portanto, compreender os efeitos da adição ou substituição de adições minerais são fundamentais para balizar os métodos de utilização das pozolanas e, posteriormente, determinar as condições que o material pozolânico pode ser utilizado sem prejuízos a vida útil da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo estão apresentadas as informações sobre as adições minerais utilizadas neste trabalho e, o processo de carbonatação junto com os respectivos fatores que influenciam na sua intensidade.

2.1 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais estão sendo utilizadas em cimentos há várias décadas e suas características são estudadas por vários pesquisadores com objetivos variados, como o aumento na resistência à compressão do concreto, modificação de propriedades como a trabalhabilidade, redução nos custos de produção de concretos e argamassas e, até mesmo, a destinação correta para resíduos industriais. Entretanto, com a grande variedade de adições existente, nem sempre todos os cuidados são tomados no sentido de proporcionar a melhor combinação de propriedades à estrutura. Em alguns casos, algumas adições podem incrementar a resistência mecânica, mas quando se avalia o aspecto da durabilidade das estruturas, algumas adições podem ter um efeito de redução da durabilidade pelo consumo da reserva alcalina. As adições pozolânicas, que por um lado promovem o aumento da resistência mecânica e refinamento da estrutura porosa, consomem o hidróxido de cálcio, fato que pode facilitar a carbonatação, e por consequência, comprometer a vida útil das estruturas em concreto armado (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; SPERB, 2003; HOPPE FILHO, 2008; CASCUDO & CARASEK, 2011).

Quando se discute sobre adições ao cimento torna-se necessário o conhecimento básico sobre o efeito fíler (físico) e o efeito pozolânico (químico).

O efeito fíler é governado pela presença de pequenas partículas provenientes das adições que, quando utilizadas em quantidades ideais, refinam a estrutura porosa. Desta maneira, cria-se uma redução da quantidade e tamanho de poros podendo obstruir alguns vazios, gerando um compósito de cimento Portland mais compacto (MORAES, 2001).

As adições com propriedades pozolânicas, segundo a norma ABNT NBR 12.653 (2012), consistem em “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes”.

A interação do material pozzolânico com o hidróxido de cálcio em um meio aquoso resulta em compostos hidratados similares aos resultantes do cimento Portland hidratado. A diferença entre os dois sistemas é que o cimento Portland puro libera o hidróxido de cálcio como um subproduto, enquanto a atividade pozzolânica utiliza desse subproduto para formação de cristais mais resistentes (HOPPE FILHO, 2008).

Assim como citado anteriormente, para que as reações pozzolânicas aconteçam, há a necessidade da presença do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland. Conforme Hoppe Filho (2008), a reserva alcalina dos concretos é composta primordialmente pelo hidróxido de cálcio liberado nas reações químicas de hidratação das fases silicato do cimento Portland. Para uma pasta de cimento CP V - ARI com relação água/cimento de 0,45, a quantidade de hidróxido de cálcio tende a estabilizar em aproximadamente 32% em relação à massa de cimento anidro, conforme apresentado na Figura 1.

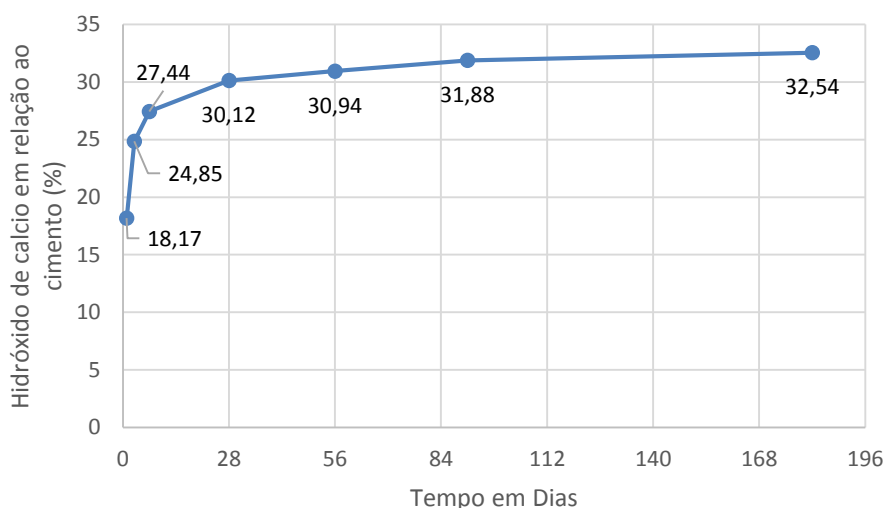


Figura 1 – Quantidade de hidróxido de cálcio liberado, na base de não voláteis, pelo cimento CP V - ARI moldado na relação água/cimento = 0,45. Adaptado de Hoppe Filho (2008).

As adições minerais podem ser utilizadas com as mais diversas funções, no entanto esses materiais não modificam apenas uma característica do concreto, mas várias, que podem ser benéficas ou não para determinadas aplicações. Givi *et al.* (2010) testaram os efeitos da cinza de casca de arroz sobre a diminuição da absorção capilar da água e constaram que para até 10% de adição do material houve redução significativa da absorção capilar. Zerbino *et al.* (2012) evidenciaram em seu estudo que existe tendência a elevação da expansão provocada pela reação álcali-sílica, quando se utiliza cinza de

casca de arroz nos compósitos de cimento Portland. Os dados expostos evidenciam que, embora as adições melhorem certas propriedades do concreto, em algumas situações, como a reação álcali-sílica, a utilização de adições minerais como a cinza de casca de arroz pode não ser favorável à durabilidade da estrutura. Demonstrando que os estudos precisam ser feitos avaliando os aspectos negativos de sua utilização, avaliando diversas formas de degradação do concreto a fim de produzir um conhecimento mais sistêmico de quais são os limites de utilização de cada adição mineral, evitando a escolha de adições minerais erradas para algumas solicitações de projeto mais específicas.

Heede e Belie (2014) estimaram a vida útil de concretos à carbonatação com teores de 15% de substituição de cimento Portland por cinza volante em ensaios de carbonatação acelerada e o tempo de despassivação das armaduras foi estimado em mais de 100 anos. Contudo, deve-se destacar que todos os traços avaliados nos experimentos de Heede e Belie (2014) tiveram relação água/aglomerante iguais ou inferiores a 0,46 e, de acordo com Possan (2004) e Papadakis (2000), para relações água/aglomerante inferiores a 0,45 pode-se considerar que a profundidade de carbonatação é quase desprezível, mas acima deste limite, o acréscimo da relação água/aglomerante e o aumento do teor de pozolana podem acelerar o processo de carbonatação.

Em concretos produzidos com adições pozolânicas existe a necessidade de avaliar certos parâmetros mais minuciosamente. A redução da reserva alcalina do material pode facilitar o processo de carbonatação, porém, o refinamento dos poros devido à atividade pozolânica e elevação no empacotamento de partículas tende a criar uma barreira física dificultando a entrada de CO_2 , reduzindo os efeitos da carbonatação. Portanto, a carbonatação não está relacionada única e exclusivamente à reserva alcalina do concreto (PAPADAKIS, *et al.*, 1991; KALAKOWSKI, 2002)

De acordo com o estudo de Possan (2004), o acréscimo do teor de sílica ativa tende a aumentar a resistência à compressão axial, porém tende a diminuir a resistência à carbonatação para traços realizados com teores de 5 a 20% de adição ao cimento. Em concretos sem adição pozolânica a reserva alcalina é maior, logo o CO_2 não avança com tanta facilidade, pois primeiramente ele reage com Ca(OH)_2 para posteriormente prosseguir para camadas mais internas. Desse modo, quanto mais hidróxido de cálcio, mais CO_2 precisa penetrar para que a frente de carbonatação avance (POSSAN, 2004).

Gobbi (2014) quantificou o consumo da portlandita por adições minerais sobre os critérios da ABNT NBR 5751 de 2012 e constatou que a quantidade de hidróxido de cálcio proposto na referida norma não é suficiente para análise da atividade pozolânica

de algumas pozolanas, demonstrando que o ensaio pode fornecer correlações erradas sobre o potencial pozolânico e por consequência aplicadas de forma errada na dosagem de concretos. Esse erro ocorreu para adições de alta reatividade como a sílica ativa, a sílica de casca de arroz e o metacaulim, as quais ocasionaram o consumo total do hidróxido de cálcio proposto pela norma, evidenciando que estas adições apresentam um potencial pozolânico maior do que a norma pode avaliar. A Figura 2 mostra o pico de maior intensidade ($34,2^\circ 2\theta$) da portlandita no ensaio de DRX, evidenciando que no caso das adições de elevada reatividade como a sílica ativa, metacaulim e sílica de casca de arroz, o pico de Ca(OH)_2 desaparece, indicando o consumo total da portlandita. Já no caso dos fíleres (calcário e quartzoso), que são inertes, os respectivos picos de hidróxido de cálcio foram identificados.

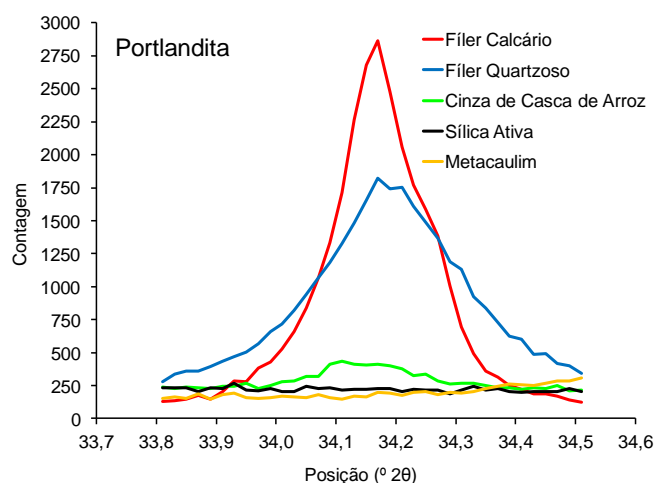


Figura 2 – Pico de difração de raios X relativo à portlandita remanescente nos diferentes sistemas de cal e adições minerais, após 7 dias de cura térmica, conforme recomendação da NBR 5751/2012 (GOBBI, 2014).

Em Possan (2004), a utilização de sílica ativa adicionada ao traço aumentou a velocidade de carbonatação. No estudo de Kulakowski (2002), o pH dos concretos passou de 13,5 para 12,7 e 12 para traços adicionados ao cimento de 10% e 20% de sílica ativa. De acordo com Tashima *et al.* (2012) e Hoppe Filho (2008), este fato pode ser explicado com o consumo da reserva alcalina pelas pozolanas para formação dos novos cristais de C-S-H.

Neste sentido, Hoppe Filho (2008) demonstrou que para cada grama vítrea de cinza volante é consumido 0,25 gramas de Ca(OH)_2 em uma pasta com 50% de substituição e 182 dias de idade. Logo, a utilização de cinza volante tende a reduzir a reserva alcalina pelo consumo do hidróxido de cálcio, que é o principal controlador do pH nas pastas cimentícias.

Gobbi (2014) apresentou com o ensaio Chappelle modificado, conforme a NBR 15895:2010, que a atividade pozolânica consumiu 1.193,00 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para cada grama de metacaulim, 1.542,00 mg para a sílica ativa, 1.336,00 mg para a sílica de casca de arroz. Assim, demonstrando os diferentes potenciais de consumo da reserva alcalina para cada adição mineral estudada.

Hoppe Filho (2008) estudou a adição de cal hidratada no concreto a fim de avaliar a possibilidade da reposição da portlandita, consumida nas reações pozolânicas, por cal hidratada, para redução do efeito da carbonatação. Nos ensaios de carbonatação acelerada, a implementação de cal hidratada não reduziu significativamente a susceptibilidade à carbonatação para as amostras avaliadas. No entanto, a utilização de cal adicionada ao cimento alterou a quantidade de cimento do traço unitário, reduzindo a reserva alcalina inicial de maneira indireta. Já Stumpp (2003) realizou a retirada do agregado miúdo para adicionar a cal, para que a reserva alcalina inicial não fosse alterada, o que resultou em redução do coeficiente de carbonatação. Papadakis (2000) também teve resultados positivos reduzindo a profundidade de carbonatação trocando a adição mineral pelo proporcional em agregado miúdo.

A atividade pozolânica tende a refinar a estrutura porosa da pasta de cimento Portland proporcionando mais resistência aos concretos, mas em casos como a adição de cinza de casca de arroz, embora haja um acréscimo na resistência à compressão e à tração, a estrutura porosa pode ficar 45% maior para poros menores que 50 nm (para as cinzas moídas em moinhos) e de 25% para traços executados com cinzas usadas sem serem moídas, em estado natural, deixando maior a estrutura porosa e, por consequência, facilitando a difusão do CO_2 (ISAIA *et al.*, 2010).

2.1.1 Metacaulim

O metacaulim pode ser produzido de duas formas diferentes, a primeira pela reutilização dos rejeitos da indústria de papel. Já a segunda e mais utilizada é a partir de argilas cauliníticas. Nos dois casos há necessidade de se calcinar o material para atribuir pozolanicidade ao mesmo (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Conforme Barata (1998), o metacaulim é classificado como um material sílico-aluminoso, geralmente proveniente da calcinação de argilas cauliníticas entre 600 e 900°C. Segundo Grim (1962) *apud* Souza (2003), os cristais de argila caulinítica são

formados por camadas tetraédricas de silicato (SiO_4) e uma camada octaédrica de gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), cujas unidades estão ligadas pelos átomos de oxigênio, conforme Figura 3.

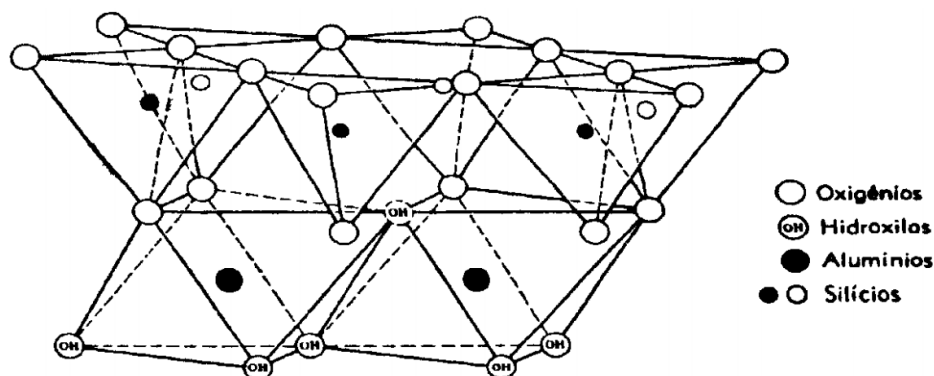


Figura 3 - Estrutura cristalina da argila caulinitica (GRIM, 1962 apud SOUZA, 2003)

As argilas por si só não têm atividades pozolânicas, mas quando aquecidas liberam os íons hidroxila de sua estrutura cristalina, gerando um novo arranjo atômico. Este processo produz um componente amorfo de grande instabilidade química chamado metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), material responsável pela atividade pozolânica. Mas, quando aquecidos a temperaturas superiores a 900°C são formados compostos cristalinos estáveis e praticamente inertes à atividade pozolânica.

O metacaulim apresenta variações em sua cor dependendo da quantidade de óxido de ferro. Quanto mais branco for o metacaulim, maior será sua quantidade de sílica e, por consequência, pode apresentar maior reatividade (MEDINA, 2011). Conforme apresentado por Malhotra & Metha (1996) na Tabela 1, a porcentagem de ferro é baixa para o metacaulim de alta reatividade, sendo o dióxido de silício e óxido de alumínio os dois principais componentes.

Tabela 1 – Composição química típica do metacaulim de alta reatividade (MALHOTRA & METHA, 1996)

Composição típica do metacaulim	Porcentagem em massa
SiO_2	51,52
Al_2O_3	40,18
Fe_2O_3	1,23
CaO	2,00
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao Fogo	2,01

Cabrera (2000) não chegou a um valor exato, mas concluiu que adições de 15% de metacaulim de alta reatividade, com área específica BET de 15 m²/g, podem consumir todo o Ca(OH)₂ disponível em concretos. É importante comentar que se isso realmente ocorrer, é possível que a armadura imersa em um concreto como este seja despassivada em pouco tempo, visto que as reações pozolânicas podem consumir todo o hidróxido de cálcio disponível do concreto.

2.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa consiste em um subproduto da indústria que produz ligas metálicas com sílica em sua composição. Os fornos aquecidos a temperaturas acima de 2.000 °C liberam SiO₂ em estado gasoso, que quando entra em contato com baixas temperaturas, solidifica-se, ficando na forma de pó, que é periodicamente removido dos filtros das chaminés (DALMOLIN, 2011).

A sílica ativa tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e a compactidade dos concretos. Primeiramente ocorre o efeito fíler, devido a sua finura que atua em uma faixa complementar a dos materiais utilizados na dosagem dos concretos e argamassas, podendo elevar o fator de empacotamento de partículas. Também ocorre o efeito pozolânico, produzindo cristais de C-S-H, favorecendo a resistência e reduzindo a porosidade (ROMANO *et al.*, 2008).

Segundo Dal Molin (2011), a superfície específica BET da sílica ativa é bem maior que a do cimento, podendo variar de 13 à 30 m²/g, contra aproximadamente 0,350 à 0,600 m²/g do cimento. As suas características estão ligadas à composição do material que estava no forno, além de temperatura de queima e tipo do forno.

A sílica ativa é uma adição mineral muito fina com partículas em formato de esfera quase perfeitas, que geral variam o seu diâmetro de 0,02 a 0,5 µm com um diâmetro médio de 0,1 µm, o que ajuda diretamente no seu grau de aproveitamento. As reações pozolânicas ocorrem predominantemente nas superfícies externas deixando o centro das partículas em estado amorfo circundado por partículas cristalizadas. Na Figura 4 é possível verificar as diferenças granulométricas encontradas e visualizar os cristais formados pela reação pozolânica na superfície externa das partículas de sílica ativa (ROMANO *et al.*, 2008).

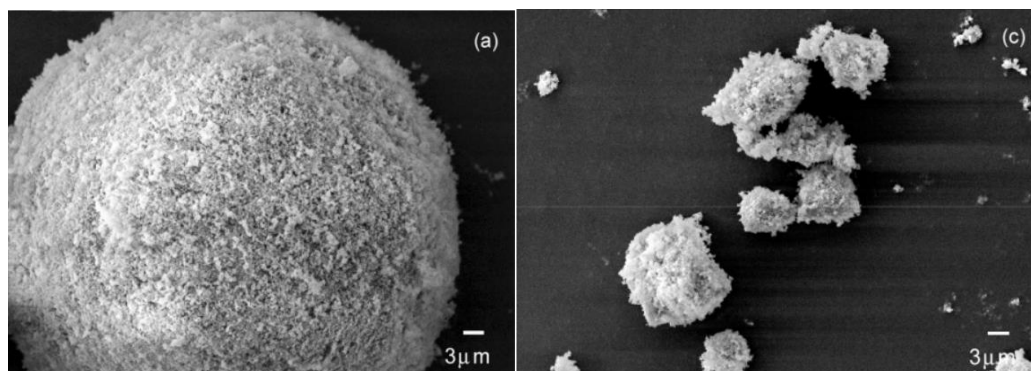


Figura 4 – Variação do tamanho das partículas de Sílica ativa em microscópio eletrônico de varredura com formação de cristais na superfície (ROMANO *et al.*, 2008).

2.1.3 Sílica de Casca de Arroz

Do total da produção de arroz, cerca de 20% de toda a massa colhida é casca que, após a queima, resulta em 20% de cinza em relação à massa do cereal com casca, ou seja, 1% de toda a produção de arroz torna-se cinza de casca de arroz. Segundo o Conselho Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção estimada de arroz no Brasil para o ano de 2014 foi de 12,25 milhões de toneladas gerando 490 mil toneladas de cinza de casca de arroz, que podem ser transformadas em sílica de casca de arroz e utilizadas como adição para concretos e argamassas (DAL MOLIN, 2011; CONAB, 2014).

No processamento do grão, a casca é retirada e posteriormente queimada sendo utilizada como combustível do próprio processo industrial. No entanto, a maior parte desse material é despejada como resíduo em áreas inapropriadas; apenas uma pequena quantidade de toda a casca de arroz produzida é aproveitada como fonte de energia (MUTHADHI & KOTHANDERAMAN, 2010).

As temperaturas de queima são os fatores determinantes para a qualidade da cinza e seu potencial reativo. As faixas de temperatura são divididas em três, a primeira entre 350 °C e 450 °C que resulta pouco material reativo, e a segunda, de 450 °C à 600 °C, com maior concentração de fração reativa, em estado amorfo. Já na terceira, de 600 °C à 800 °C, foi constatado que as partículas de cinza ficam com formatos muito irregulares e com tamanho de partículas mais elevado, perdendo o seu potencial pozolânico (MUTHADHI & KOTHANDERAMAN, 2010).

Conforme Muthadhi e Kothanderaman (2010), as condições ideais de queima são a uma temperatura de 500 °C por 120 minutos, para uma produção de cinzas com

pozolanicidade máxima e com maior índice de sílica amorfa, densidade máxima e alto grau de finura.

Conforme Della *et al.* (2006), a cinza de casca de arroz tem um formato lamelar, e embora a calcinação a fragmente em partículas menores, o formato característico da cinza ainda continua, embora em escalas reduzidas, assim como pode ser visto na Figura 5.

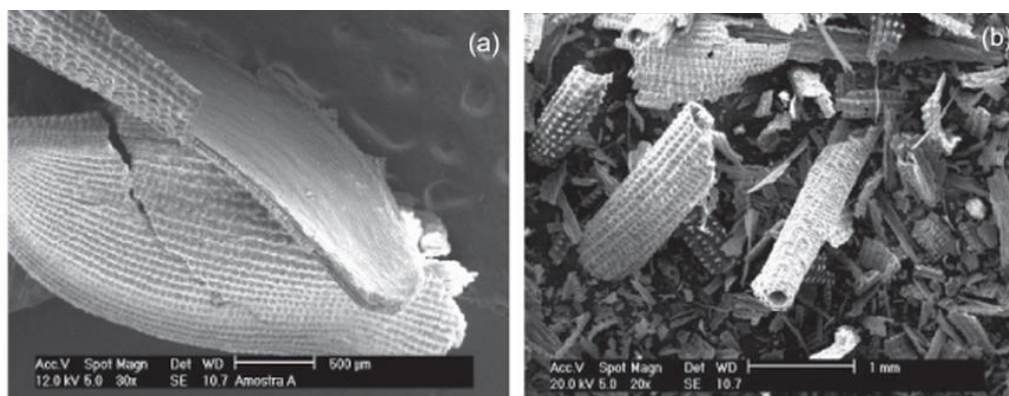


Figura 5 – Morfologia da casca de arroz (A) e cinza de casca de arroz (B) (DELLA *et al.*, 2006).

Segundo Mehta (1977) *apud* Pouey (2006), para cada faixa de temperatura de queima se encontra uma área superficial diferenciada. Neste estudo, Mehta testou seis condições de queima diferentes e cada uma apresentou uma área específica diferente, mostrando a importância do processo de queima para padronização do material final.

Conforme Tashima *et al.* (2012), a concentração de SiO_2 pode variar entre 83,53% e 99,3%, com a quantidade de material em estado amorfo variando em função da temperatura de queima. Se este material tiver uma queima adequada, pode desenvolver um alto índice de atividade pozolânica. Na verdade, a sílica de casca de arroz é reconhecida como de elevada reatividade, como evidenciado no trabalho de Gobbi (2014).

Porém, quando utilizada em compostos de cimento Portland, a cinza de casca de arroz gera um aumento na demanda por água, visto que sua elevada área específica BET e seu formato irregular tendem a aumentar o atrito e as forças de atração entre as partículas. Esta característica aumenta a necessidade por água ou por aditivo dispersante (SPERB, 2003).

2.1.4 Cinza Volante

A combustão do carvão produz dois tipos de cinzas, a primeira, de granulometria maior e conseqüentemente chamada de cinza pesada. Este material se deposita no fundo das fornalhas sendo retirada hidraulicamente para sua destinação final. A cinza volante é a parcela mais fina desse material que é arrastada pelos gases da combustão e removida do ar por filtros eletrostáticos que conseguem reter de 95 à 99% de todas as partículas que seriam liberadas na atmosfera (SILVA *et al.*, 1999).

Segundo Sperb (2003), a queima adequada do carvão é determinante para a qualidade da cinza volante. Se tal procedimento for realizado de maneira inadequada, o material resultante terá características físico-químicas heterogênicas, resultando em perda de qualidade.

Assim, o carbono presente nas cinzas volantes é resultado da queima incompleta do carvão, cujo teor residual é determinado pelo índice de perda ao fogo. Este índice inclui carbono livre, carbonatos, água combinada e dióxido de carbono, sendo assumido como aproximadamente o conteúdo de carbono do material (AZEVEDO, 2002).

Embora a atividade pozzolânica não seja muito afetada pelo teor de carbono residual, a quantidade de água de amassamento necessária pode ser influenciada pela quantidade de carbono presente na cinza volante. Como o carbono contido na cinza apresenta alta porosidade, é capaz de absorver grandes quantidades de água (AZEVEDO, 2002).

Conforme a ASTM C 618-05, a cinza volante pode ser caracterizada em duas classes, conforme sua composição. A classe “C” é proveniente de carvão sub-betuminoso e lignita, sendo composta por 20% de óxido de cálcio, tendo propriedades cimentícias e pozzolânicas. A classe “F” é originária da queima de carvão betuminoso, e dificilmente apresenta concentrações maiores que 15% de óxido de cálcio (SPERB, 2003; NEVILLE & BROOKS, 2013).

Embora a finura da cinza volante seja maior do que a sílica ativa, metacaulim e sílica de casca de arroz, as partículas de cinza volante têm elevada finura, o que as tornam um bom material de enchimento, e a sua área específica BET elevada, de aproximadamente 3,63 m²/g, ajuda nas reações pozzolânicas, o que resulta em material de boa qualidade para uso como adições em concretos e argamassas (SPERB, 2003; HOPPE FILHO, 2008).

A atividade pozolânica da cinza está relacionada aos teores de SiO_2 e Al_2O_3 amorfos, visto que a fração vítrea é quem reage com a cal livre para formar compostos hidratados resistentes. Segundo Alonso e Wesche (1991) apud Azevedo (2002), as cinzas com teores inferiores a 35% de SiO_2 são consideradas inertes como pozolanas, no entanto as cinzas comerciais têm em torno de 55 à 60 % de sílica amorfa o que garante seu potencial pozolânico.

Hoppe Filho (2008), constatou que o consumo de hidróxido de cálcio por grama de cinza volante foi de 0,482 grama, utilizando o método do Chapelle modificado. Embora não tenha uma grande intensidade de reação, a cinza volante é utilizada em grandes teores de substituição, até 50% em massa para o cimento CP IV e 14%, também em massa, para o cimento CP II - Z, conforme as normas NBR 5736/1991 e NBR 11.578/1991, respectivamente.

Os efeitos mais procurados da cinza volante nas propriedades do concreto estão relacionados ao acréscimo da plasticidade e coesão e a redução no calor de hidratação durante a cura. O tempo de início de pega também pode variar conforme o teor de cinza adicionado. Em idades avançadas, os benefícios gerados pela dissipação do calor de hidratação de maneira mais distribuída, somado com o refinamento da estrutura porosa decorrente das reações pozolânicas que ocorrem ao longo do tempo, resultam em maiores resistências mecânicas em idades avançadas (SPERB, 2003).

2.1.5 Fíler quartzoso

Também conhecido como pó de quartzo, o fíler quartzoso tem seu diâmetro variando entre 5 e 25 μm , com partículas médias de 15 μm . Este material é destinado à produção de tintas, plásticos e borrachas.

Já na área da construção civil, como esse material não apresenta atividade química, sendo caracterizado como inerte, ele é normalmente utilizado para execução de concretos de pós reativos, pois ajuda a preencher os vazios existentes entre os grãos, contribuindo para o empacotamento das partículas (CASTRO *et. al*, 2009; DAL MOLIN, 2011; GOBBI, 2014).

Segundo Lawrence et al (2003), a hidratação nas primeiras idades de concreto com adição de fíler de quartzo é sempre mais intensa do que no traço de referência. O que explica a hidratação mais intensa é que a distribuição de pequenas partículas em torno do

grão de cimento deixa a camada de hidratos mais fina e mais espalhada, o que acelera o processo de hidratação do cimento, como visto na Figura 6.

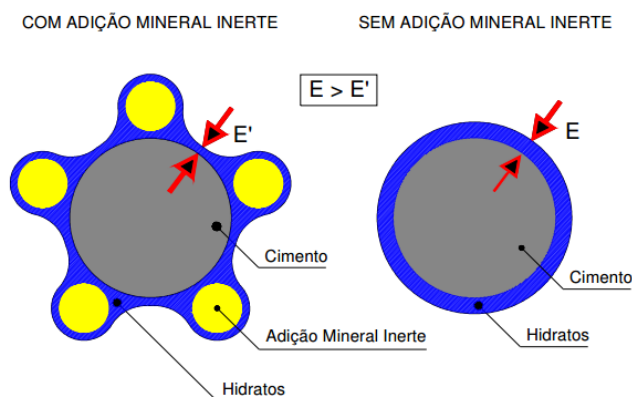


Figura 6 – Representação esquemática da hipótese que explica a melhora da hidratação do cimento para adições inertes (HOPPE FILHO, 2008 adaptado de LAWRENCE *et al.*, 2003).

2.2 CARBONATAÇÃO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND

Avaliando que a maioria das estruturas executadas hoje em dia no Brasil é feita com o sistema estrutural em concreto armado, pode-se dizer que os efeitos da carbonatação tem impacto sobre grande parte das obras da sociedade, sejam pontes, prédios, barragens ou outra estrutura qualquer, de modo que quantificar os efeitos desse fenômeno de degradação sobre elas é primordial para estabelecer sua durabilidade.

As reações químicas da carbonatação iniciam na face externa da peça de concreto e por difusão do CO_2 , avançam para o interior com o passar do tempo. A interface entre o concreto que já foi carbonatado e o não carbonatado é chamada de frente de carbonatação assim como pode ser visto na Figura 7 (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; HOPPE FILHO, 2008; CASCUDO & CARASEK, 2011).

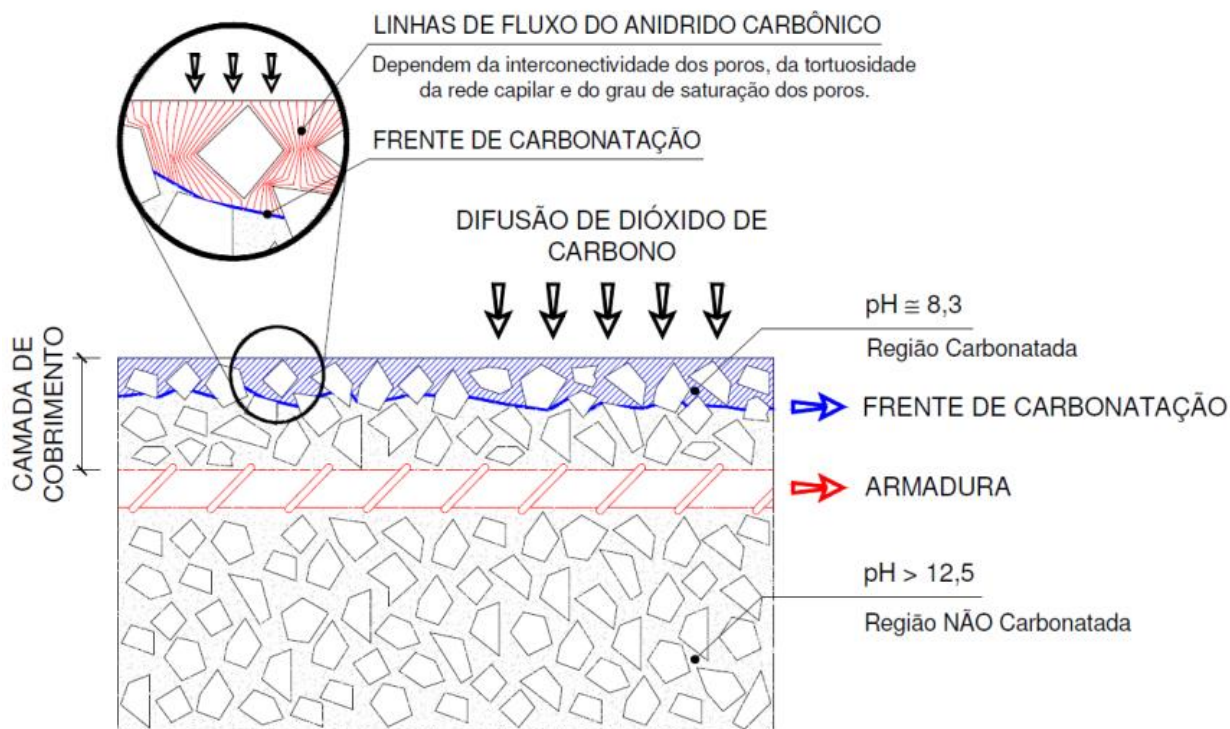
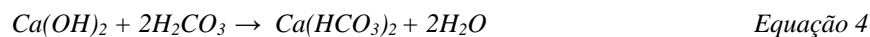
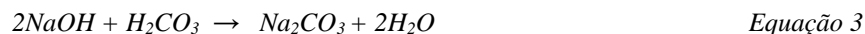


Figura 7 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação (HOPPE FILHO, 2008 adaptado de MEDEIROS & HELENE 2001)

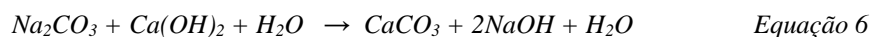
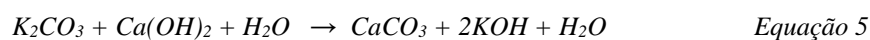
O efeito da carbonatação gera mudanças químicas nos compósitos de cimento hidratado que, por consequência, reduz o pH da pasta cimentícia, provocando a despassivação da armadura, o que reduz a resistência à corrosão. Após a despassivação, o aço carbono inserido no concreto fica suscetível à corrosão desde que haja um eletrólito, oxigênio e a atuação de uma diferença de potencial (HELENE, 1993).

Conforme Hoppe Filho (2008), Pina (2009), Cascudo & Carasek (2011), a carbonatação consiste em transformar compostos alcalinos em sais carbonato por meio da ação ácida do dióxido de carbono. A reação química da carbonatação está associada à presença de CO_2 e água nos poros na matriz hidratada e com a presença desses dois compostos juntos com os hidróxidos de metais alcalinos (hidróxidos de cálcio, potássio e sódio), as reações químicas envolvidas na carbonatação se iniciam, conforme as equações 1 a 4.

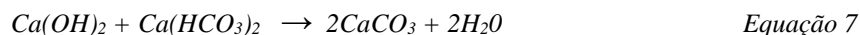
Primeiramente, o CO_2 presente na atmosfera se dissolve em água formando o ácido carbônico, conforme a Equação 1. Posteriormente, os hidróxidos de potássio e sódio reagem com o ácido carbônico formando os carbonatos de potássio e sódio, como apresentam as Equação 2 e 3. Também ocorre paralelamente a reação do hidróxido de cálcio com ácido carbônico formando o bicarbonato de cálcio, como indica a Equação 4 (HOUST & WITMANN, 2002; WOLF, 2010).



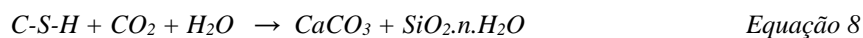
A segunda etapa do processo acontece entre os carbonatos gerados na primeira etapa e o hidróxido de cálcio, gerando uma retroalimentação do processo. Conforme apresentado nas Equações 5 e 6 (PINA, 2009; WOLF, 2010).



Avaliando que a quantidade de $Ca(OH)_2$ é muito mais elevada que os outros hidróxidos, o pH do concreto é governado pela concentração de hidróxido de cálcio. Logo, a reação de maior influência no aspecto da carbonatação do concreto foi proposta por Taylor (1997), ilustrada na Equação 7

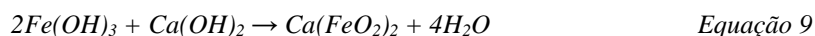


No entanto, os silicatos e aluminatos de cálcio C-S-H também podem ser convertidos em carbonatos embora com pouca intensidade, assim como apresentado na Equação 8 (STEFFENS et al., 2002; PINA, 2009).



Segundo Cascudo (1997), a armadura presente no interior do concreto, em meio alcalino, fica protegida pela presença de uma película protetora de caráter passivo e este filme de proteção pode ser composto por variações da magnetita (Fe_3O_4) ao γ - Fe_2O_3 . Em condição de semipassivação, na qual se enquadram a maioria das estruturas de concreto armado, a película de passivação é composta por duas camadas. A primeira, e mais interna, é composta por óxido de ferro e a segunda por óxido de ferro e geotita (α - $FeO.OH$). A película de passivação também pode ser efeito da ferrugem superficial

combinada com o hidróxido de cálcio, conforme visto na Equação 9, proposta por Basílio (1972) *apud* Helene (1993).



Conforme Cascudo (1997), quando a carbonatação ainda não ocorreu e a película passivadora está intacta, a corrosão não é totalmente nula, mas é desprezível quando relacionado à vida útil da estrutura, pois a velocidade de corrosão do aço em um concreto que não foi carbonatado é de 0,001 mm/ano da seção de aço. Esta situação é válida desde que o concreto não esteja sendo atacado por íons cloreto.

Após a despassivação, a velocidade de corrosão das armaduras devido à carbonatação pode chegar a 0,05 mm/ano, ou seja, 50 vezes maior do que a situação citada anteriormente (BASHEER *et al.*, 2001; MALHEIRO *et al.*, 2014).

2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO

A durabilidade de uma estrutura de concreto mantém uma relação direta com a microestrutura porosa da matriz cimentícia hidratada, pois é através da rede de poros interligados que acontece o transporte de massa no concreto, seja líquido ou gasoso. Parte da porosidade está relacionada ao excesso de água utilizado na mistura do concreto que, após a solidificação, tende a evaporar fazendo do poro capilar uma via de acesso ao interior da peça (FRIZZO, 2001).

Outras causas de transporte de massa podem estar relacionadas com a microfissuração, que pode ter origem na exsudação, na retração por secagem, na expansão térmica, no carregamento acima do projetado e à falta de cuidados durante a cura da peça (HELENE, 1993).

Desse modo, o transporte de agentes agressivos no interior do concreto é dirigido por vários mecanismos físico-químicos. Dentro desses mecanismos existem diversas variáveis: fissuração, estrutura porosa e interconexão dos poros, grau de saturação dos poros e umidade relativa, velocidade de renovação e concentração de agentes agressivos. Todas essas variáveis podem contribuir de alguma forma para os mecanismos de transporte de massa no concreto por permeabilidade, absorção ou difusão (HELENE, 1993; SILVA, 2011; FRIZZO, 2001).

Além disso, um fator agravante é que os diversos tipos de transporte de massa podem ocorrer simultaneamente, com intensidades variadas, o que dificulta a definição de um modelo de transporte de massa e, consequentemente, a proposição de modelos de vida útil precisos (SILVA, 2011).

Existem vários mecanismos de transporte de massa no interior do concreto, porém serão apresentados apenas os que são partes importantes para este trabalho, a difusão, a permeabilidade e a absorção capilar.

2.3.1 Difusão

Difusão é o transporte de massa espontâneo, em um sistema físico-químico baseado em gradientes de concentração. Resultando em um fluxo de região de alta concentração para regiões de baixa concentração (HELENE, 1993; MEDEIROS, 2008).

Embora a difusão do CO₂ seja mais intensa no ar do que na água, se o concreto estiver totalmente seco as reações químicas da carbonatação não acontecem. Por isso, a situação mais crítica de difusão do dióxido de carbono para o interior do concreto é quando a umidade estiver entre 50 e 80%, pois muita água retarda a difusão, e na ausência de água não acontece carbonatação (NEVILLE, 1997).

Conforme Cascudo (1997), a difusibilidade iônica acontece em meio externo e até mesmo dentro do próprio concreto, em substâncias líquidas e gasosas. Os poros capilares, que ficam parcialmente saturados, funcionam como vias de transporte de CO₂. Estas vias alimentam canais de menor diâmetro que geralmente estão saturadas o que acaba retardando o processo.

2.3.2 Permeabilidade

Permeabilidade é a facilidade com a qual líquidos e gases se movimentam no interior do concreto. Essa propriedade é um dos principais parâmetros de durabilidade dos concretos e argamassas, sendo um grande indicativo da capacidade de transporte de massa interna do concreto. Ela também representa a interligação, tortuosidade e rugosidade dos poros e, por consequência, a facilidade de uma substância, seja líquida ou gasosa, em permear um volume de concreto. Os poros capilares são os maiores responsáveis por essa característica, pois eles permitem a interconexão entre os poros, com o agravante que o aumento do diâmetro dos capilares atuará como agente facilitador,

viabilizando o transporte interno de substâncias, assim como o CO₂. Logo, o transporte de dióxido de carbono será mais intenso quanto maior forem as conexões entre os poros, desde que não estejam saturados com água, assim como representado na Figura 8 (CASCUDO, 1997).

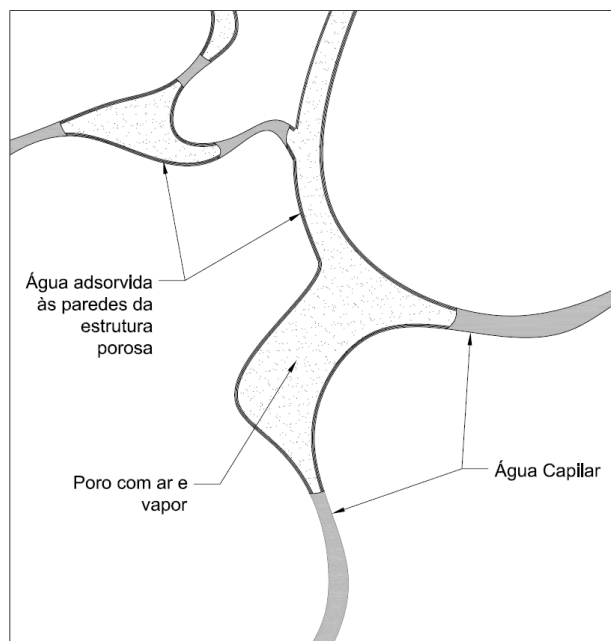


Figura 8 – Esquema da conexão entre os poros. Adaptado de HELENE (1993)

Existem correlações entre a permeabilidade e a qualidade do concreto, assim como a apresentada no documento CEB -192 e exibida por Cascudo (1997):

Tabela 2 – Critérios de Avaliação de permeabilidade à água (CEB – 192 apud CASCUDO, 1997).

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do Concreto	Qualidade do Concreto
$<10^{-12}$	Baixa	Boa
10^{-12} a 10^{-10}	Média	Média
$>10^{-10}$	Alta	Pobre

Segundo Helene (1993), Max *et al.* (2007) e Neville (2013), a permeabilidade é diretamente proporcional à relação a/c, pois quanto maior for a quantidade de água maior será a quantidade e tamanho dos poros e, por consequência, terá maior permeabilidade. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 9.

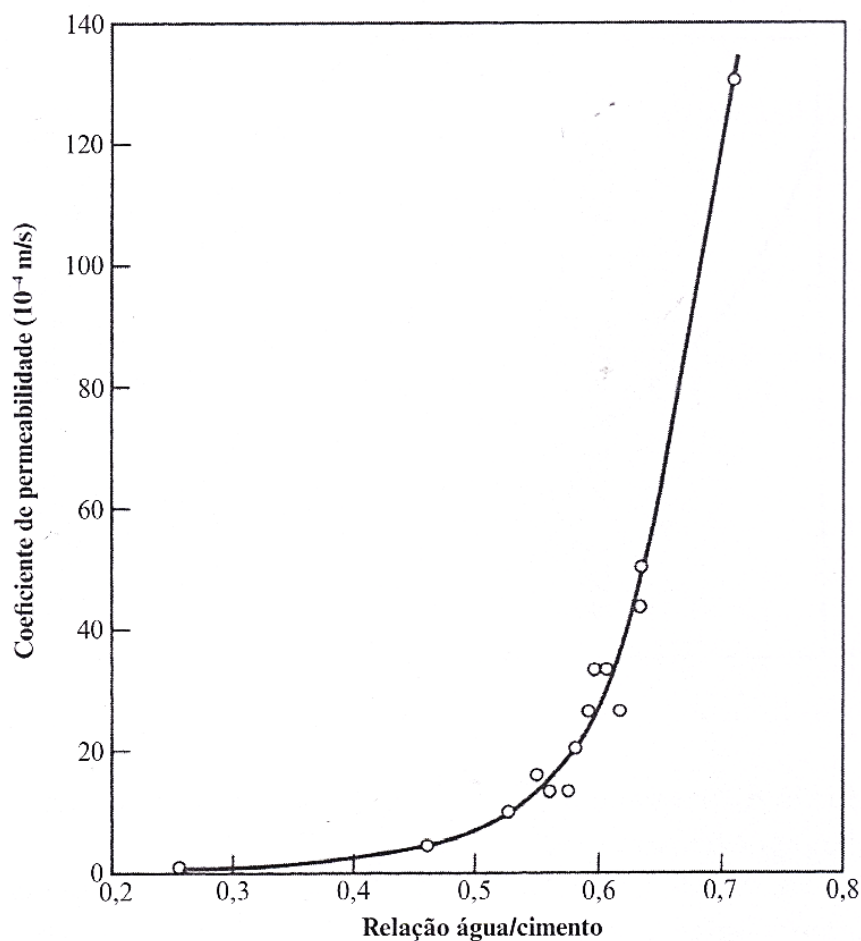


Figura 9 – Relação entre a permeabilidade e a relação a/c em pastas de cimento com grau de hidratação de 93% (POWERS *et al.* 1954, adaptado de NEVILLE, 2013).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), relacionado especificamente à quantidade de água em concretos sem adições, quando a relação a/c passa de 0,4 para 0,8, o volume de poros aumenta 5 vezes, por consequência, a permeabilidade do CO_2 aumenta em 10 vezes. No entanto, segundo Barin (2008), a permeabilidade não é fator predominante para a facilidade de carbonatação em concretos com adições minerais, outros fatores devem ser avaliados e com ênfase na reserva alcalina.

2.3.3 Absorção Capilar

A absorção capilar é um fenômeno que ocorre nas estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre líquidos que estão em contato com a superfície. Embora a absorção capilar não participe do transporte de CO_2 , ela é responsável pelo transporte de água para o interior do concreto, e sem este elemento a carbonatação não acontece. Absorção capilar também está ligada a interconexão entre os

poros e os diâmetros dos mesmos que, por sua vez, é a tendência de líquidos se deslocarem entre superfícies muito próximas, assim como a estrutura porosa do concreto. A penetração de água por absorção capilar depende da viscosidade do fluido e diâmetro interno dos poros. De acordo com Helene (1993) e Neville (2013), a absorção capilar é mais ativa nos poros na faixa de $0,1\mu\text{m}$ a $1.000\mu\text{m}$, chamados de poros capilares. Logo, verifica-se a importância da relação água/cimento e dos procedimentos de cura, pois estes dois fatores podem influenciar diretamente na facilidade de transporte de massa no concreto.

A absorção capilar da água no concreto é um fator de difícil controle. Quanto menor for o diâmetro do capilar, maior será a ascensão do líquido no seu interior, assim como observado na Figura 10. Por outro lado, quanto maior for o diâmetro do capilar, maior será a quantidade total de água absorvida. Dessa maneira, como a porosidade e permeabilidade estão relacionadas com a absorção capilar, quanto menor a relação água/cimento, maior será a profundidade atingida. Por outro lado, deve-se considerar que quando se reduz a relação água/cimento, a interconexão entre os poros também é reduzida o que dificulta a absorção capilar (HELENE, 1993).

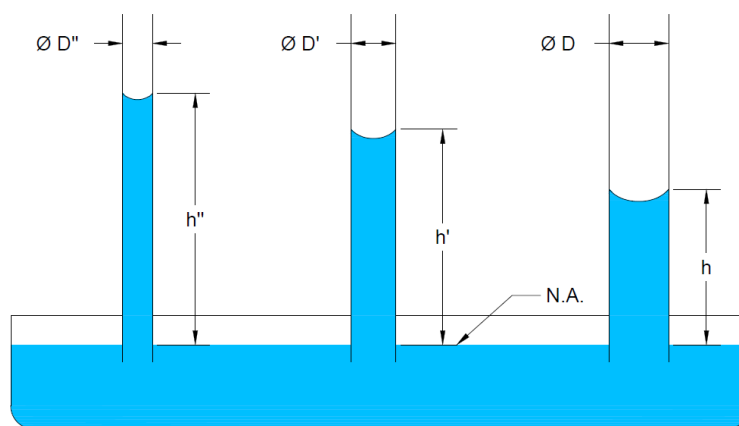


Figura 10 – Esquema de capilaridade para diâmetro pequeno, médio e grande. Quanto menor for o diâmetro capilar, maior será a força de absorção capilar.

Como pode ser observado na Figura 11, assim como a permeabilidade, a absorção capilar também é influenciada pela relação água/cimento, fato que ocorre porque este parâmetro tem uma relação diretamente proporcional à porosidade e permeabilidade (MAX et al., 2007).

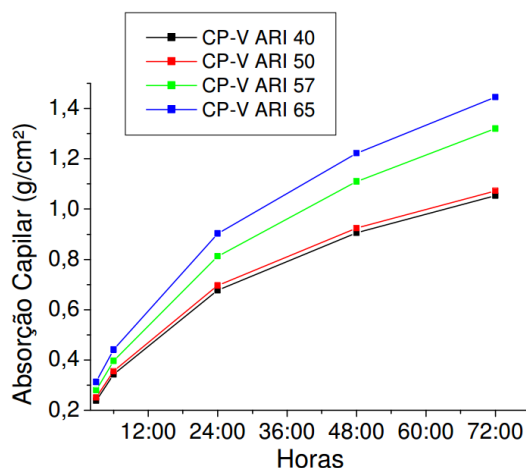


Figura 11 – Absorção de água por capilaridade de concretos com CP-V ARI e relações a/c de 0,40 – 0,50 – 0,57 – 0,65 (MAX *et al.*, 2007).

Conforme Valipour *et al.* (2013), a substituição em proporções adequadas de cimento por material pozolânico pode ser mais efetiva na redução da absorção que a redução da relação água/cimento.

Concretos e argamassa executados com adições minerais podem ter variações da absorção ao longo do tempo. Isso ocorre porque as mudanças da microestrutura, em concretos feitos com adições pozolânicas, pode ser menos intensa nas primeiras idades, mas esse processo perdura ao longo do tempo se comparado com um concreto sem adição de pozolana (MAX *et al.*, 2007).

2.3.4 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é o parâmetro que indica a dificuldade ou a facilidade que a corrente elétrica tem em passar através de um material; basicamente é o inverso da condutibilidade. Quando relacionada ao concreto armado, o aumento da resistividade tende a proteger as armaduras imersas no concreto. Desse modo, se o concreto tiver pouca resistividade, as barras de aço carbono estarão menos protegidas da corrosão quando expostas às condições que a levam à oxidação do aço. Desta maneira, a intensidade da corrosão do aço e a durabilidade das estruturas estão diretamente ligadas à resistividade elétrica (CASCUDO, 1997; RIBEIRO *et al.*, 2012).

A relação água/cimento e a porosidade são características que têm forte impacto de variação na resistividade elétrica do concreto. Quando a porosidade for alta, a

resistividade do material tende a ser alta para concretos com baixa umidade, devido à redução da quantidade de eletrólito. Quando o concreto estiver saturado, esta alta porosidade irá reduzir a sua resistividade deixando-o mais condutivo, pois a água e os íons liberados pela dissolução dos minerais da matriz hidratada do próprio concreto formam substâncias condutivas (ABREU, 1998).

A variação deste parâmetro está intimamente ligada à umidade do concreto, quantidade de poros em sua microestrutura, relação água/cimento, quantidade e modalidade de aditivos e adições, composição do cimento, evolução de atividade pozolânica e carbonatação (ANDRADE, 2004; HOPPE, 2005; SANTOS, 2006; SANTOR *et al.*, 2012).

Com a variação da resistividade elétrica é possível avaliar as mudanças na microestrutura do concreto. Essas mudanças podem ser relacionadas às adições utilizadas ou até mesmo ao grau de hidratação que é correlacionado com a idade da amostra. Para a carbonatação, as mudanças ocorrem devido à formação de CaCO_3 que acaba refinando a estrutura porosa pela colmatação dos mesmos, o que interfere diretamente na resistividade elétrica superficial (SANTOS *et al.*, 2014; HOPPE, 2005; ABREU, 1998; RAISDORFER & MEDEIROS, 2014).

2.4 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A avaliação do fenômeno da carbonatação no concreto pode ser realizada de forma natural, com a exposição do material ao meio ambiente. Porém, dessa forma, o teor de CO_2 a que o concreto está exposto é bem menor do que em uma situação controlada, aumentando consideravelmente o tempo de ensaio e muitas vezes inviabilizando a pesquisa. Conforme Helene (1993) e Cascudo e Carasek (2010), a concentração de CO_2 no meio ambiente é de 0,03% em ambientes rurais, podendo chegar a 1,8 % em ambientes industriais específicos, como um silo de armazenagem.

Mesmos que os ensaios naturais de longa duração apresentem a interação com o meio agressivo e as intempéries, permitindo avaliar os efeitos simultâneos cumulativos dos agentes agressivos e a real colmatação dos poros, é necessário aplicar métodos acelerados visando otimizar o tempo de pesquisa (ANDRADE, 1997; POSSAN, 2004).

Dessa forma, o método de ensaio de carbonatação acelerada consiste em colocar uma amostra de concreto em uma câmara climatizada que controla os níveis de umidade,

temperatura e concentração de CO_2 , os quais são os fatores ambientais mais significantes relacionados à esse fenômeno.

Nos ensaios acelerados, grande parte dos pesquisadores (ATIS, 2003; CADORE, 2008; BARDAR *et al.* 2014) utilizam concentrações em torno de 5%, ou seja, aproximadamente cinco vezes maior que a concentração de ambientes urbanos e 167 vezes mais concentrada quando comparado à ambientes rurais. Em alguns casos, foram utilizadas concentrações de 50%, como em Younsi *et al.* (2013), e de até 100% em Vera *et al.* (2012).

Porém, a determinação dos coeficientes de carbonatação acelerada requer cuidados maiores quando os ensaios acelerados têm curta duração. Os ensaios de curta duração podem não representar corretamente a colmatagem dos poros causado pela precipitação do CaCO_3 , que tende a atenuar a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Assim, ensaios mais longos representam o fenômeno completo tornando o coeficiente de carbonatação mais próximo do real, dando mais confiabilidade nos modelos de previsão de vida útil (POSSAN, 2004).

Como ilustra a Figura 12, Possan (2004) concluiu que para elevadas relações água/aglomerante (da ordem de 0,8) ocorre um acréscimo da frente de carbonatação de 35% em relação a concretos com água/aglomerante igual a 0,3, em ensaios acelerados com utilização de sílica ativa em substituição parcial ao cimento. Neste estudo é possível observar que a substituição de 10% de sílica ativa, não alterou com significância a profundidade de carbonatação. Este resultado foi obtido em ensaio acelerado com ambiente controlado em 70% de U.R., 25 °C e 5% de CO_2 . A análise dos resultados de Possan (2004) indica que a carbonatação de concreto moldado com relação água/aglomerante (cimento + sílica ativa) igual ou inferior a 0,45 praticamente não se altera com a utilização de sílica ativa, independentemente do teor utilizado, variando de 5 a 20%. Portanto, o refinamento da microestrutura da matriz hidratada, decorrente da atividade pozolânica da sílica ativa, restringe a difusão do anidrido carbônico e reduz o avanço da frente de carbonatação, apesar do menor teor remanescente de portlandita. Desta forma, fica evidente que o teor de portlandita na matriz hidratada não é o único parâmetro responsável por restringir o avanço da frente de carbonatação, ou seja, a porosidade, a distribuição do diâmetro dos poros e a interconectividade da rede capilar exercem influência significativa sobre a carbonatação do concreto. Em suma, para relações água/aglomerante superiores a 0,45, prepondera o teor de portlandita na matriz hidratada como parâmetro controlador da carbonatação do concreto, enquanto que, para

relações água/aglomerantes inferiores a 0,45, a microestrutura passa a controlar o avanço da carbonatação.

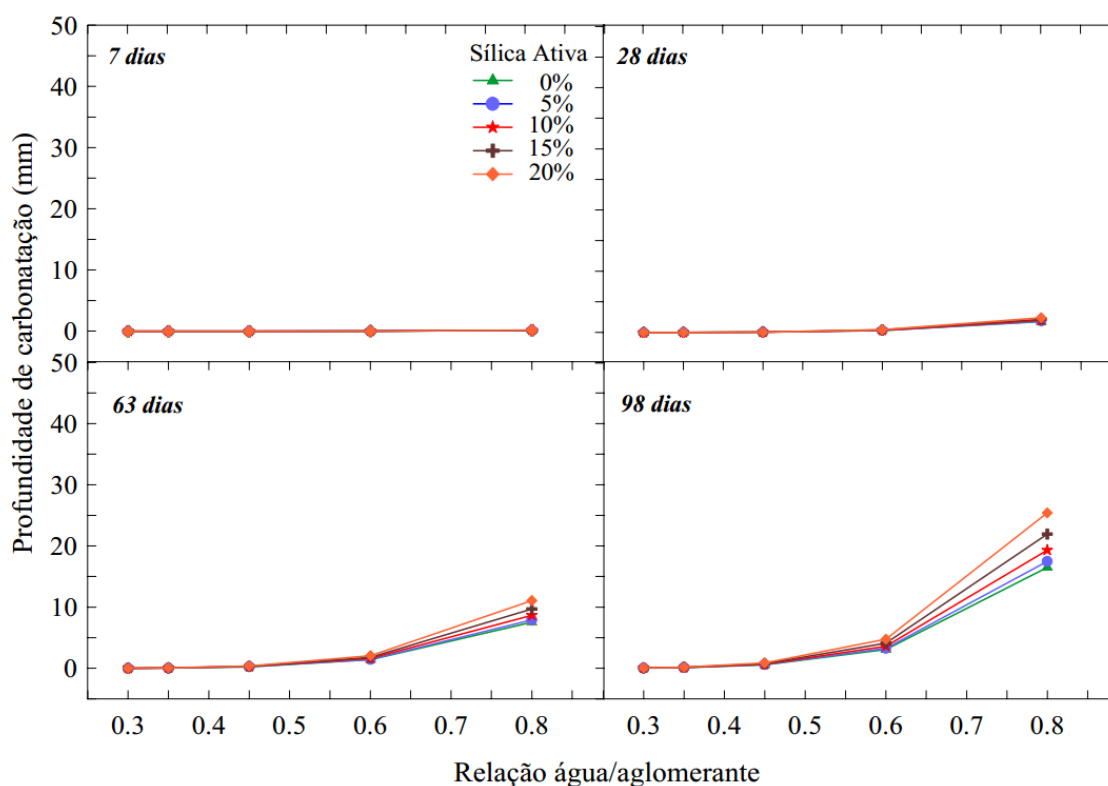


Figura 12 – Influência da interação entre relação água/aglomerante e teor de sílica ativa na profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2004).

A umidade relativa da câmara de carbonatação afeta diretamente a velocidade de deslocamento da frente de carbonatação. Caso a umidade relativa seja muito baixa, valores inferiores a 50%, a propagação da carbonatação dentro da peça é minimizada, pois a água é insuficiente para a dissolução do CO_2 , logo não há a formação do ácido carbônico.

A umidade relativa muito alta também reduz o avanço da frente de carbonatação. Isso ocorre, pois quando a rede capilar está saturada de água, o transporte de dióxido de carbono ao interior do concreto é reduzido, por consequência, diminuindo a quantidade de CO_2 disponível para as reações químicas da carbonatação e retardando o fenômeno químico.

Em Pauletti *et al.* (2007) foi constatado que a maioria dos pesquisadores utilizam umidades relativas que variam entre 50 e 85% e, na maioria dos casos, prepondera a

umidade relativa de 60%. Essas escolhas são facilmente justificadas quando se visualiza a Figura 13.

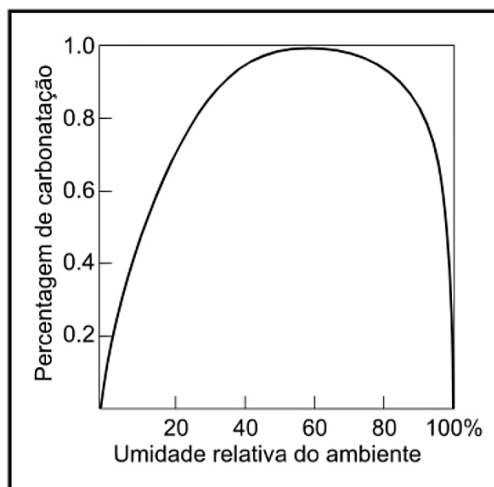


Figura 13 – Umidade relativa do ambiente x grau de carbonatação (ROSEMBERG *et al.* 1989 apud Cascudo 1997 adaptado de HELENE, 1993).

Nos ensaios de carbonatação acelerada também há uma preocupação sobre o sazonalamento ou pré-condicionamento das amostras. A umidade interna do concreto tem grande importância na velocidade de avanço da frente de carbonatação. Assim, um processo de sazonalamento incorreto pode modificar a velocidade de propagação da frente de carbonatação de maneira fora do padrão por haver regiões com umidades diferentes dentro do concreto, ou fazendo com que o excesso de umidade retarde o processo nas primeiras idades de carbonatação acelerada.

O método NORIE, apresentado em Pauletti (2004), foi desenvolvido pelo Núcleo Orientado para Inovação da Edificação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O processo constitui-se em dispor os corpos de prova, em uma sala climatizada, com umidade e temperatura controladas e, quando a variação do peso do corpo de prova for menor que 0,10 g em 24 horas, a amostra está apta para o ensaio de carbonatação acelerada.

Alguns pesquisadores adotam o método da RILEM TC 116-PCD (1999). Após a cura, os corpos de prova devem ser colocados em estufa a $50 \pm 1^\circ\text{C}$ até alcançar uma perda de massa calculada previamente. Posteriormente, devem ser embalados por plásticos de maneira que não ocorram perdas ou ganhos de umidade, em seguida devem ficar mais 14 dias em estufa à $50 \pm 1^\circ\text{C}$ até que a umidade interna seja perfeitamente redistribuída dentro dos corpos de prova.

Com relação ao consumo de cimento, Pessôa e Nepomuceno (2002), concluíram que quanto maior for o consumo de cimento, maior será a resistência à carbonatação. Isso é devido ao fato de que o acréscimo na quantidade de cimento gera uma maior reserva alcalina por unidade de volume e, desta forma, há necessidade de mais tempo para que a frente de carbonatação progrida, logo, uma maior reserva alcalina tende a dificultar o avanço da frente de carbonatação.

Relacionado à temperatura, quanto maior ela for, maior será a intensidade das reações químicas que acontecem na carbonatação. No entanto, Maekawa *et al.* (2003) e Pina (2009) verificaram que pequenas variações de temperatura não têm tanta influência na variação da intensidade de carbonatação.

A concentração de CO₂ também é uma variável importante do processo. Pauletti (2004) avaliou amostras de argamassas expostas à ambientes com 6 e 60% de concentrações de CO₂, e a carbonatação foi 2,16 vezes mais intensa para a maior concentração.

Pauletti *et al.* (2007) fez um levantamento das concentrações utilizadas por vários pesquisadores, e encontrou relatos que para concentrações muito altas, 100%, foram encontrados coeficientes de carbonatação incomuns. Em geral, é recomendado a utilização de percentuais inferiores a 20%, mais do que isso podem acontecer mudanças na microestrutura dos concretos ensaiados que não condizem com a realidade.

Também foi realizado um levantamento das configurações utilizadas por pesquisas recentes para a aceleração do processo de carbonatação, afim de adequar o trabalho às tendências atuais sobre carbonatação acelerada. Esses dados estão apresentados na Tabela 3. Como pode ser visto cada pesquisador tem configurações diferenciadas para a aceleração do processo de carbonatação, o que em geral são consequências das limitações dos aparelhos utilizados. Em alguns casos os pesquisadores fabricam seus próprios aparelhos e a determinação das configurações de operação são feitas em função da vazão de gás e volume das câmeras o que pode trazer diferenças significativas para as pesquisas mais novas que usam câmeras com sensoramento eletrônico.

Tabela 3 – Levantamento das configurações utilizadas em ensaios acelerados dos últimos anos.

Pesquisador	U.R.%	Temp. °C	CO2 %
Pizzol <i>et al.</i> (2014)	90	60	15
Heede & Belie (2014)	60	20	10
Duprat <i>et al.</i> (2014)	65±5	20±0.5	5
Bardar <i>et al.</i> (2014)	65±5	24±5	5±0.3
Younsi <i>et al.</i> (2013)	65±5	20±2	50±5
Bernal <i>et al.</i> (2012)	50	23	4
Vera <i>et al.</i> (2012)	60-70	25	100
Bernal <i>et al.</i> (2012)	65±5	23±2	1±0.1
Harrison <i>et al.</i> (2012)	55	20	1
	65	20	2
	55±5	20±2	4±0.5
	65±5	20±2	50±5
	55	20	50
	65±10	23±3	20±3
Ji <i>et al.</i> (2010)	70	20	20
Cadore (2008)	50	23	4
Sisomphon & Franke (2007)	65	20	3
Paulleti (2004)	75±5	20±1	6
Atis (2003)	65±5	20	5
Sperb (2003)	75±1	23±1	10
Stumpp (2003)	75±1	22±2	5
Castro (2003)	65	28±1	5 à 6

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

Todos os materiais utilizados nessa pesquisa foram caracterizados e serão aqui apresentados. Primeiramente serão apresentados os agregados e posteriormente os aglomerantes, incluindo as cinco adições minerais empregadas: metacaulim, sílica ativa, sílica de casca de arroz, cinza volante e fíler quartzoso.

3.1.1 Agregados

Foi usada areia natural proveniente do município de Balsa Nova, região metropolitana de Curitiba, comumente utilizada na região com as características apresentadas na Tabela 4 – Caracterização do agregado miúdo e na Figura 14.

Tabela 4 – Caracterização do agregado miúdo

Areia natural	Resultado	Norma
Massa específica (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52 (2009)
Massa unitária (g/cm ³)	1,54	NBR 7251 (2006)
Módulo de finura	2,34	NBR NM 248 (2001)
Teor de material pulverulento (%)	0,70	NM 46 (2003)
Impurezas orgânicas	Mais clara que a padrão	NBR 7221 (2012)

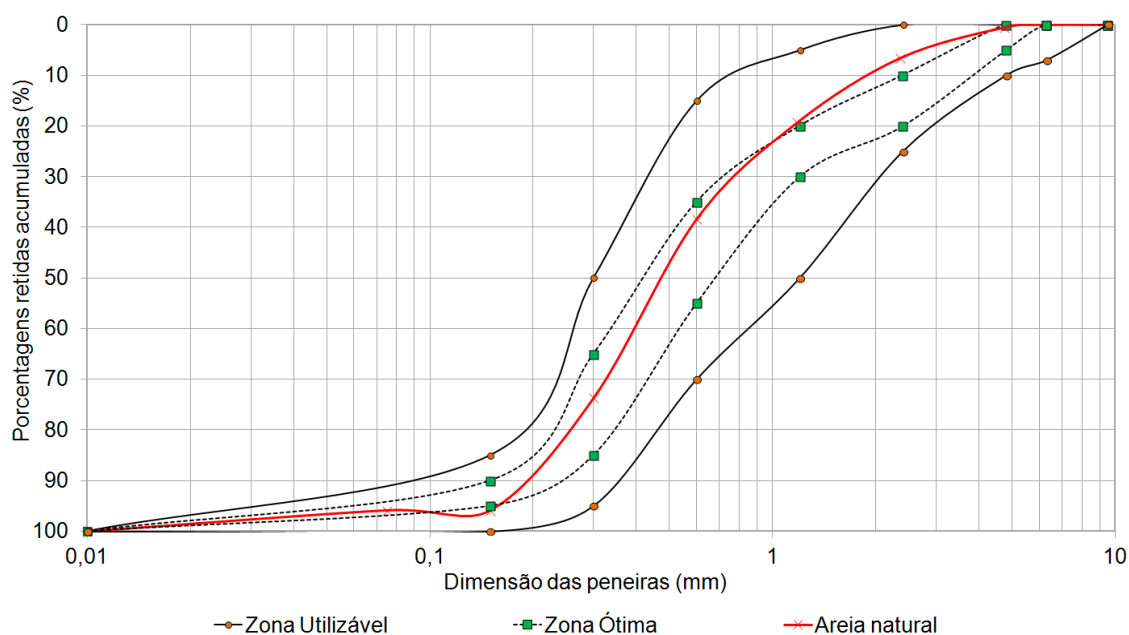


Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo, conforme ABNT NBR 7211(2009).

O agregado graúdo empregado foi um basalto com dimensão máxima característica de 19 mm. A Tabela 5 e Figura 15 apresentam os resultados da caracterização do agregado graúdo.

Tabela 5 – Caracterização do agregado graúdo

Brita 1	Resultado	Norma
Massa específica saturada superfície seca – sss (g/cm ³)	2,62	NBR NM 43 (2009)
Massa específica seca (g/cm ³)	2,64	NBR NM 43 (2009)
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,61	NBR NM 43 (2009)
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,47	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária estado compactado (g/cm ³)	1,54	NBR NM 45 (2006)
Diâmetro Médio Característico (mm)	19	NBR 7211 (2009)
Absorção (%)	0,4	NBR NM 43 (2009)

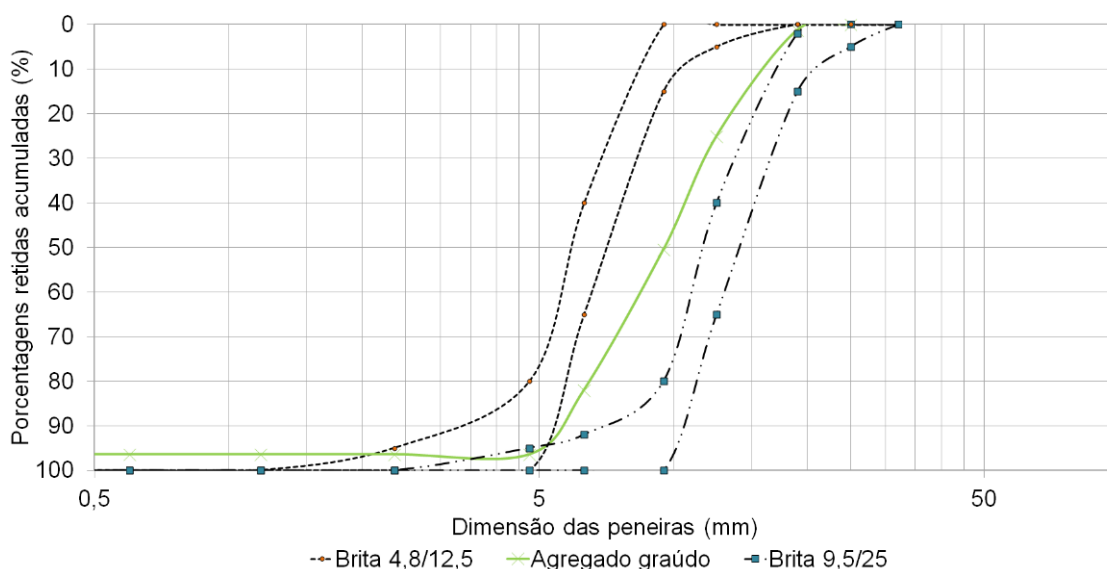


Figura 15 – Granulometria agregado graúdo, conforme ABNT NBR 7211 (2009).

3.1.2 Aditivo

Foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração, de pega normal com coloração castanha e composição a base de policarboxilato em meio aquoso. A densidade é de 1,07 g/cm³ e pH de $4,5 \pm 1,0$. Suas quantidades foram dosadas especificamente para cada traço apresentar abatimento no troco de cone (*slump*) de 10 ± 2 cm.

3.1.3 Aglomerantes

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, escolhido por ser o cimento mais puro encontrado em Curitiba e região. Como o estudo é sobre adições, quanto mais puro é o cimento, menor a interferência devido à combinação de adições diferentes. A massa específica média deste cimento é de 3,09 g/cm³ e a Tabela 6 indica as propriedades físicas e mecânicas declaradas pelo fabricante para o lote utilizado nesta pesquisa.

Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do cimento Portland CP V – ARI.

Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do cimento Portland CP V – ARI.										
Análise química										
CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO livre (%)	Perda Fogo (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)	
60,00	18,38	4,22	2,65	4,37	2,82	0,67	2,97	0,68	0,58	
Análise física							Análise mecânica			
Expansão Quente (mm)	Início Pega (h)	Fim Pega (h)	Consistência Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
0.50	02:20	03:00	28	4.130	0.40	3.60	22,5	34,8	42.00	48,8

(fonte: Itambé 15/10/14)

Para avaliar a quantidade de portlandita no cimento anidro foi realizado uma termogravimetria do material, e o teor de hidróxido de cálcio disponível foi de 3,70%, encontrado pela perda de massa relativa à água de composição da cal entre as temperaturas de 340°C e 485°C, faixa de temperatura referente à decomposição do hidróxido de cálcio, assim como visto na Figura 16.

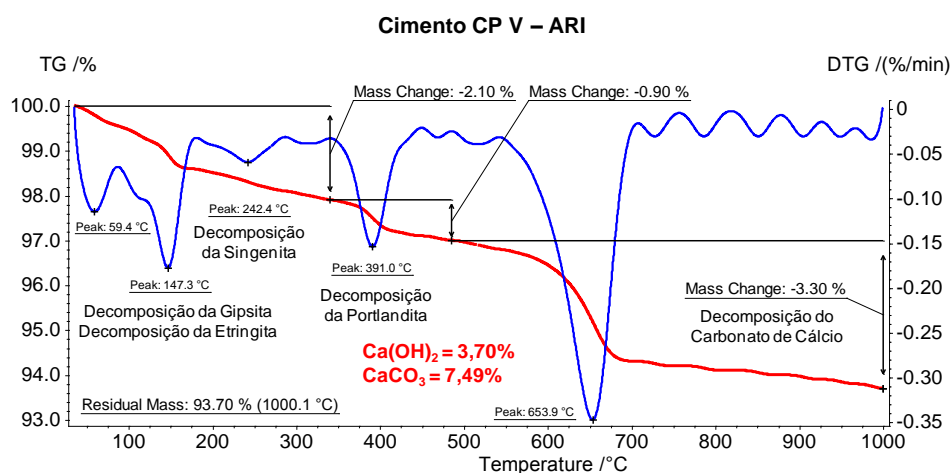


Figura 16 – Análise termogravimétrica do Cimento CP V – ARI anidro

Devido à grande quantidade de ensaios de caracterização utilizados para a execução deste trabalho, decidiu-se apresentar os resultados de massa específica, área específica Blaine e BET e o ensaio Chapelle modificado agrupadas na Tabela 7. Na Tabela 8 são apresentados os resultados da Fluorescência de raios X (FRX)

Tabela 7 – Características físicas e resultados do ensaio Chapelle modificado das adições minerais

	Massa específica (g/cm ³)	Área específica BET (m ² /kg)	Atividade Pozolânica Chapelle modificado [mg Ca(OH) ₂ /g]
Cimento CPV-ARI	3,09	1.070	Não se aplica
Metacaulim	2,5	23.259	1.193
Sílica Ativa	2,18	20.238	1.542
Sílica de Casca Arroz	2,12	14.693	1.336
Cinza Volante	1,95		408
Fíler Quartzoso	2,60	1.227	140

O método Chapelle, conforme a norma NBR 15.895/2010, é fundamentado na capacidade de fixar cal em condições pré-estabelecidas após um tempo padronizado, sendo a reação acelerada pela elevação da temperatura, ou seja, uma proporção de 1 grama de material supostamente pozolânico para 2 gramas de cal (CaO) são colocados para reagir em banho-maria (90 ± 5 °C). A mistura é mantida reagindo por 16 h. A cal consumida é calculada pela diferença de cal adicionada e remanescente após o ensaio. A pozolanicidade do material é admitida quando ocorre consumo de óxido de cálcio superior a 330 mg CaO/g pozolana, por estequiometria, este valor corresponde a 436 mg Ca(OH)₂/g pozolana. Nota-se claramente nos resultados da Tabela 7 que o fíler quartzoso e a cinza volante não apresentaram consumo de hidróxido de cálcio suficiente para a classificação como material pozolânico.

Com exceção do fíler de quartzo, que teve o consumo do hidróxido de cálcio estimado em 140 mg de Ca(OH)₂/g e a cinza volante em 408 mg de Ca(OH)₂/g, o que é abaixo da especificação das pozolanas, todas as outras adições minerais tiveram potencial reativo suficiente para serem qualificadas como adições com atividade pozolânica. Se comparado com o mínimo especificado pela norma para ser um material pozolânico, a sílica ativa tem capacidade reativa de 3,53 vezes acima da capacidade exigida pela norma, o metacaulim em 2,73 e a sílica de casca de arroz em 3,06 vezes a exigência mínima da norma, o que as coloca em uma condição de super pozolanas, exigindo da sua aplicação maiores cuidados frente ao consumo de hidróxido de cálcio.

A Tabela 8 mostra a análise química por fluorescência de raios X das adições estudadas, onde verifica-se que todas as adições estudadas apresentam o SiO_2 como material principal em sua composição. Sendo o metacaulim e a cinza volante as adições como menores concentrações de SiO_2 .

Tabela 8 – Resultado da fluorescência de raio-X.

Amostras	Composição Química (%)														
	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	MgO	ZnO	MnO	CuO	Rb ₂ O	Tm ₂ O ₃	SrO
Cimento CPV-ARI	10,45	1,36	3,71	73,21	3,59	-	0,26	3,05	3,66	0,02	0,14	-	-	0,11	0,43
Metacaulim	45,86	-	3,90	0,14	46,05	-	2,22	1,69	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01
Sílica ativa	92,49	2,76	0,13	0,51	1,91	-	-	2,08	-	0,02	0,07	0,02	0,01	-	-
Sílica de casca de arroz	88,94	4,18	0,11	1,10	2,42	0,24	-	2,08	-	0,01	0,88	0,02	0,02	0	-
Cinza Volante	57,80	3,00	6,20	1,60	26,30	0,10	1,30	0,30	0,80	0,09	0,09	-	0,10	-	0,10
Fíler quartzoso	95,65	-	-	-	2,43	-	0,04	1,77	-	0,02	-	0,02	-	-	-

A granulometria dos aglomerantes está representada na Figura 17, mostrando que todas as adições minerais deste trabalho apresentam menor finura que o cimento CP V – ARI utilizado neste estudo. Vale salientar que acredita-se haver alguma falha no uso da técnica de granulometria a laser para a adição de sílica ativa, que pode estar mantendo as partículas aglomeradas durante o ensaio, fazendo com que os dados do ensaio não representem a realidade para a sílica ativa. Isso poderia explicar o fato de que os dados do BET indicarem que a sílica ativa, apresentou resultados de área superficial maior do que a do cimento utilizado, como indicado na Tabela 7.

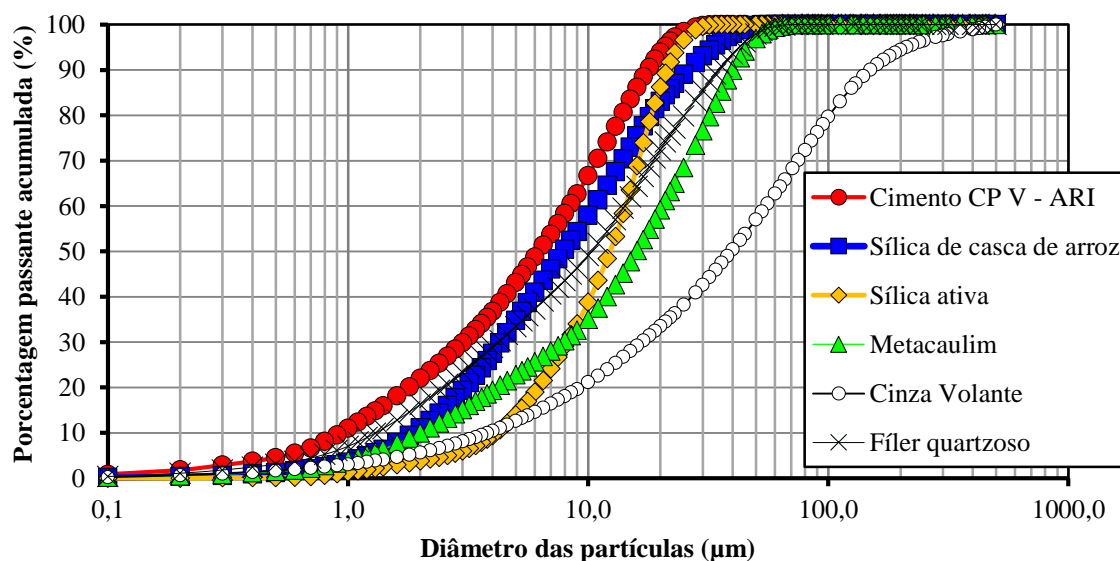


Figura 17 – Granulometria a laser dos aglomerantes

A avaliação dos difratogramas de raios-X (DRX), apresentado na Figura 18, embora não seja um método quantitativo, é possível dizer que quanto maior for a área halo formado, identificado pela área amarela da figura, maior é a proporção de material amorfo com potencial pozolânico, demonstrando que a adição mineral tem capacidade pozolânica e também proporciona uma referência aproximada de seu potencial pozolânico (HOPPE FILHO, 2008).

O difratograma do metacaulim (Figura 18), apresentou picos característicos de quartzo, caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e muscovita ($\text{K}.\text{Al}_2(\text{Al}.\text{Si}_3.\text{O}_{10}).(\text{OH})_2$), assim como apresentados na Tabela 9, mas além das fases cristalinas, também houve presença de uma estrutura vítrea, representada pelo halo amorfo no difratograma, constituída basicamente de sílica e alumina sem arranjo atômico característico, como também constatado por Medina (2011).

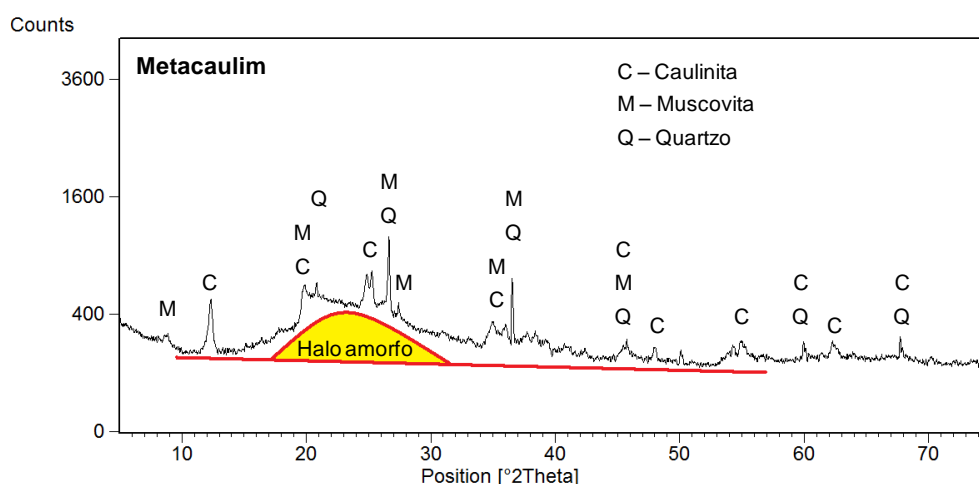


Figura 18 – Difratograma da amostra de metacaulim.

Tabela 9 – Minerais encontrados no difratograma do metacaulim

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
46-1045	Dióxido de silício	SiO_2	Quartzo
29-1488	Caulinita	$\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$	Caulinita
01-1098	Muscovita	$\text{Al}_3\text{H}_2\text{KO}_{12}\text{Si}_3$	Muscovita

A análise termogravimétrica da amostra de metacaulim, Figura 19, tinha 0,46% de umidade contida na amostra referente às perdas de massa até 100°C. Entretanto, a perda de massa total foi de 6,6% com um diferencial entre 380°C e 625°C referente a

desidratação da caulinita. A perda de massa acima de 625°C pode ser relacionada a ruídos do ensaio visto que não apresentam picos característicos da termogravimetria derivada.

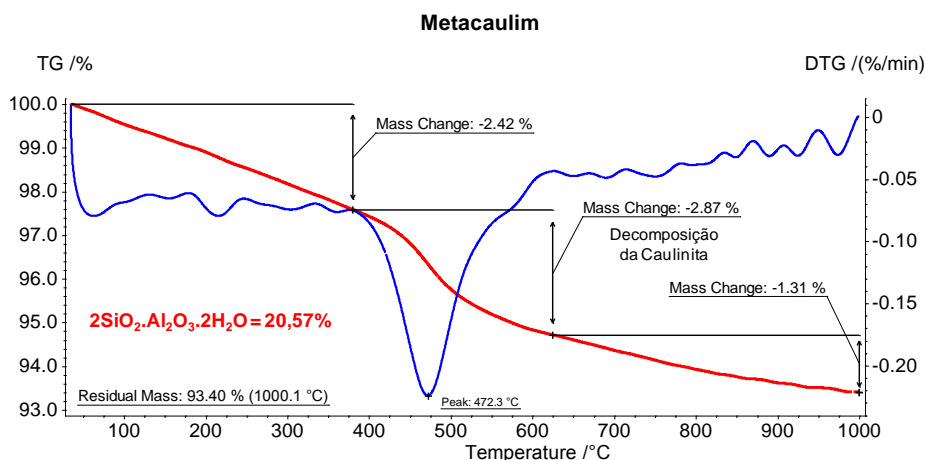


Figura 19 - Análise termogravimétrica do metacaulim.

A DRX da amostra de sílica ativa apresenta-se totalmente amorfa (vítrea), conforme apresentado na Figura 20, com a ocorrência do halo amorfo característico de materiais pozzolânicos. Quando comparada com o metacaulim, a sílica ativa apresenta um halo amorfo maior, demonstrando que a quantidade de material amorfo com potencial pozzolânico é maior que a do metacaulim.

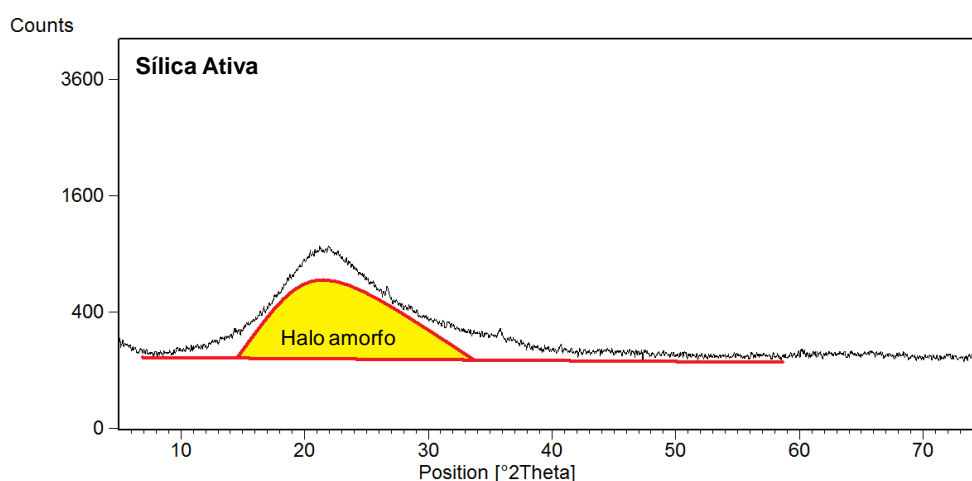


Figura 20 – Difratoograma da amostra de sílica ativa.

A análise termogravimétrica da sílica ativa, Figura 21, apresentou perda de massa de 2,70% que pode ser resultado de uma contaminação por umidade da amostra.

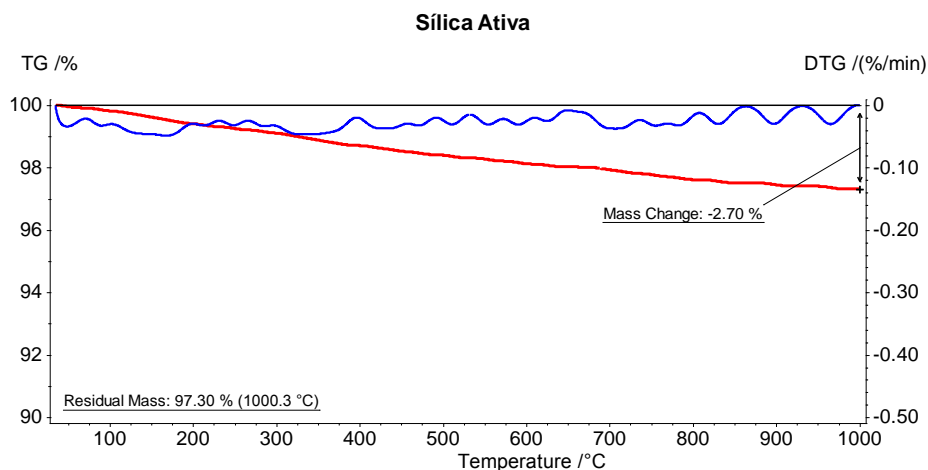


Figura 21- Análise termogravimétrica da sílica ativa.

Na DRX da amostra de sílica de casca de arroz (Figura 22) foram identificados picos referentes à cristobalita (SiO_2), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea, uma estrutura cristalina. Os halos da sílica ativa e da sílica de casca de arroz são muito parecidos, o que demonstra que a quantidade de material amorfo entre as duas amostras é muito semelhante. Os minerais identificados também estão registrados na Tabela 10.

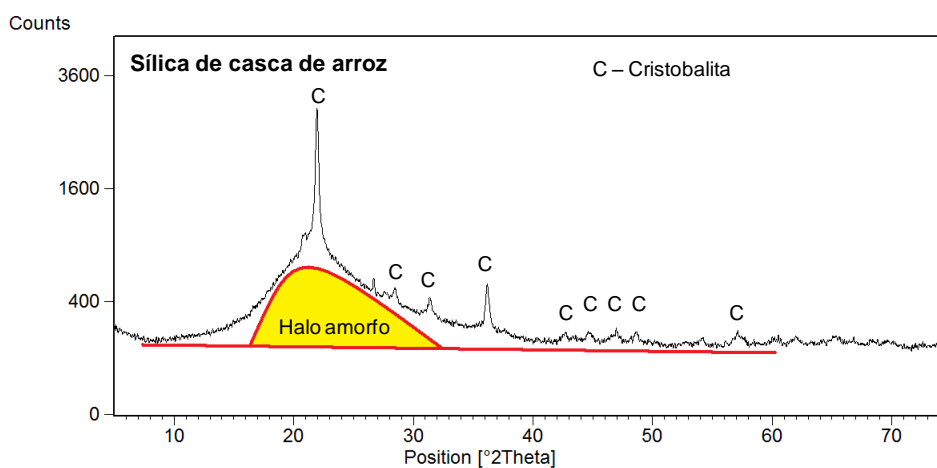


Figura 22 – Difractograma da amostra de sílica de casca de arroz.

Tabela 10 - Minerais encontrados no difratograma do sílica de casca de arroz

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
39-1425	Dióxido de silício	SiO_2	Cristobalita

A análise termogravimétrica da Sílica de Casca de Arroz, Figura 23, teve perda de massa de 3% até 1000 °C sendo que até 100°C a perda de massa foi de apenas 0,2%.

Pode-se considerar que a perda até 100°C é referente à evaporação da água adsorvida na estrutura alveolar desta adição. Como não houve pico significativo dos compostos hidratados ou carbonatados, a perda de massa entre 100°C e 1000°C pode estar relacionada a volatilização do material orgânico residual contido no material.

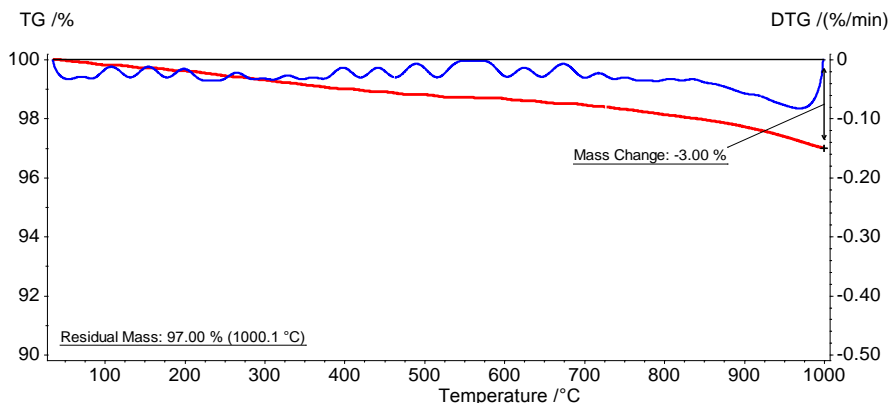


Figura 23 - Análise termogravimétrica da sílica da casca de arroz.

Na análise por DRX da cinza volante foram identificados picos de Mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e de Hematita (Fe_2O_3). Além das fases cristalinas citadas, foi verificada a presença do halo amorfo característico das adições pozolânicas, assim como visto na Figura 24 e os minerais que compõem a amostra na Tabela 11. Embora a cinza volante tenha um halo amorfo bem identificado, ele é menor do que os apresentados pela sílica ativa, pelo metacaulim e pela sílica de casca de arroz. Isso é um indicativo do menor teor de fração vítrea da cinza volante em comparação com as três adições citadas, sendo este um resultado esperado devido ao fato de que as três pozolanas citadas são consideradas de alta reatividade.

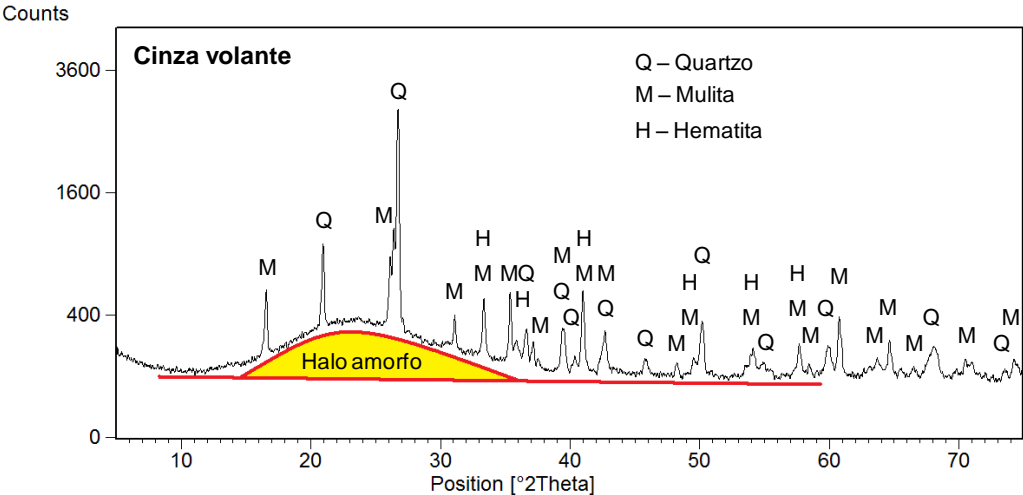


Figura 24 – Difratograma da amostra de Cinza volante

Tabela 11 - Minerais encontrados no difratograma do cinza volante

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
46-1045	Dióxido de silício	SiO ₂	Quartzo
15-0776	Sílico aluminato	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	Mulita
01-1053	Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	Hematita

A Figura 25 apresenta o difratograma da DRX do fíler quartzoso, em que foi identificado quartzo como única fase cristalina. Deve-se notar que o difratograma não apresenta halo característico de fase amorfa, confirmando que este é um material cristalino e inerte, atuando apenas para melhoria do empacotamento de partículas.

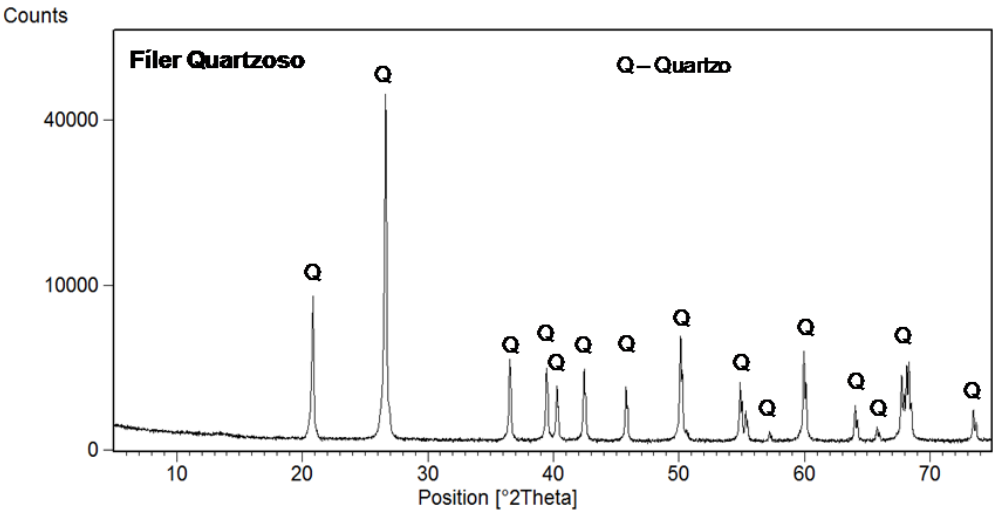


Figura 25 – Difratograma da amostra de fíler quartzoso.

O fíler quartzoso perdeu apenas 1,30% do total da sua massa. Não houve perda de massa até a temperatura de 100°C, o que indicou inexistência de umidade na amostra, assim como demonstrado na Figura 26.

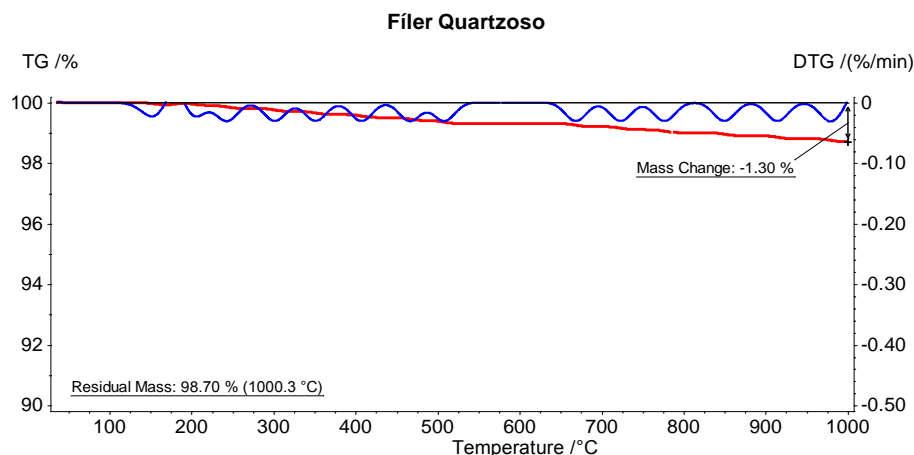


Figura 26 - Análise termogravimétrica do fíler quartzoso

3.2 PROPORÇÃO DE MISTURA DOS CONCRETOS

Os concretos estudados foram dosados de 2 formas:

- 1 – dosagem da adição mineral em substituição parcial ao consumo de cimento;
- 2 – dosagem da adição mineral em adição ao consumo de cimento.

As adições foram empregadas com teor de substituição ou adição de 10% em massa, com exceção da cinza volante que foi empregada nos teores de 10 e 30%, a fim de avaliar também os concretos com alto teor de cinza volante, assim como apresentado na Figura 27. Com o traço de referência, são treze traços ao todo analisados nesse estudo.

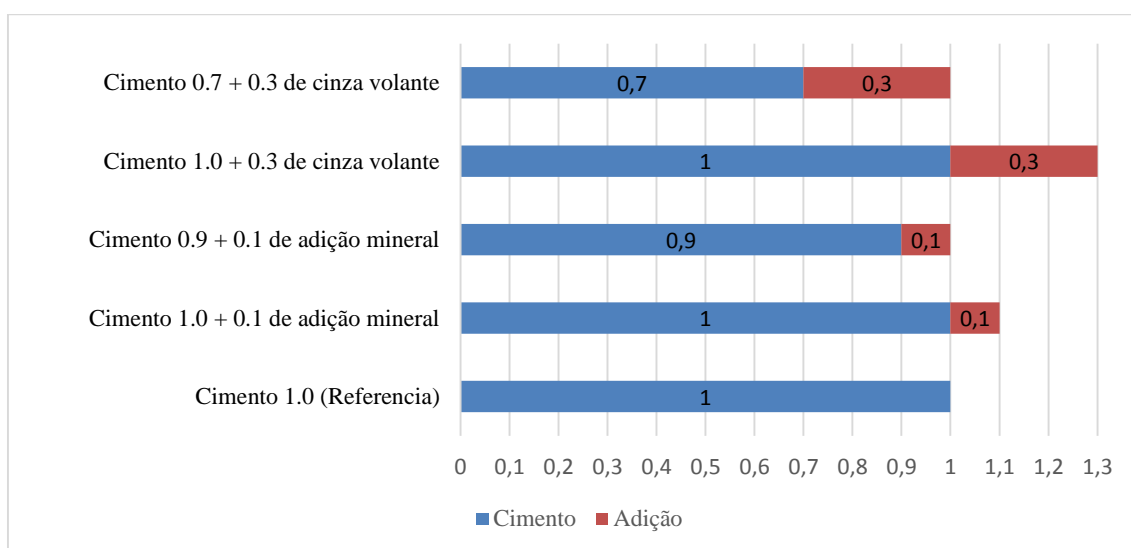


Figura 27 – Esquema de apresentação de adição e substituição.

Todos os traços que compõem o estudo foram realizados a partir de um traço base variando apenas tipo de adição e o modo de utilização das mesmas, assim como visto na Tabela 12. As relações água/finos e proporção de agregados foram fixadas e apenas a quantidade de aditivo superplastificante foi variada de modo a manter o slump em 10 ± 2 cm.

Tabela 12 – Traços conforme confeccionados em betoneira.

Traço Unitário Teórico						
	Cimento	Areia	Brita	A/Ag	Cons. Cim (kg)	
	1,00	2,25	3,00	0,5	353,08	
Traço em Massa (Referência)						
a/agl.	Vol (m³)	Cim. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	
0,500	1,000	353,08	794,43	1059,24	176,5	
Substituição de 10% (kg) e 30% (kg) para a cinza volante						
Traço	Adição	Cimento	Areia	Brita	Água	Adit %
Sub. Metacaulim	35,31	317,77	794,43	1059,24	176,54	1,50
Sub. S. Ativa	35,31	317,77	794,43	1059,24	176,54	2,00
Sub S. C. Arroz	35,31	317,77	794,43	1059,24	176,54	1,00
Sub F. Quartzo	35,31	317,77	794,43	1059,24	176,54	1,00
Sub C. Vol 10%	35,31	317,77	794,43	1059,24	176,54	0,70
Sub C. Vol 30%	105,92	247,16	794,43	1059,24	176,54	0,74
Adição de 10% (kg) e 30% (kg) para a cinza volante						
	Adição	Cimento	Areia	Brita	Água	Adit %
Ad. Metacaulim	35,31	353,08	794,43	1059,24	194,19	1,00
Ad. S. Ativa	35,31	353,08	794,43	1059,24	194,19	1,40
Ad. S. C. Arroz	35,31	353,08	794,43	1059,24	194,19	0,73
Ad. F. Quartzo	35,31	353,08	794,43	1059,24	194,19	1,00
Ad. C. Vol 10%	35,31	353,08	794,43	1059,24	194,19	1,00
Ad. C. Vol 30%	105,92	353,08	794,43	1059,24	229,50	0,26

No entanto, com as pequenas variações da massa específica das adições, o traço tem pequenas alterações que podem ser visualizadas na Tabela 13 e Tabela 14

Tabela 13 – Traços recalculados em massa por m³ de concreto

	C. Agl (kg)	Cim. (kg)	Ad. (kg)	Massa Areia (kg)	Massa Brita (kg)	Água (kg)
Referência	353,08	353,08		794,43	1059,24	176,54
Sub. Metacaulim	352,23	317,01	35,22	792,52	1056,69	176,11
Ad. Metacaulim	382,98	348,16	34,82	783,36	1044,49	191,49
Sub. S. Ativa	351,50	316,35	35,15	790,88	1054,51	175,75
Ad. S. Ativa	382,20	347,45	34,75	781,77	1042,36	191,10
Sub. S. C. Arroz	351,34	316,21	35,13	790,52	1054,03	175,67
Ad. S. C. Arroz	382,02	347,30	34,73	781,41	1041,89	191,01
Sub. F. Quartzo	352,42	317,18	35,24	792,95	1057,26	176,21
Ad. F. Quartzo	383,18	348,35	34,83	783,78	1045,05	191,59
Sub. C. Vol 10%	350,84	315,75	35,08	789,38	1052,51	175,42
Ad. C. Vol 10%	381,48	346,80	34,68	780,30	1040,40	190,74
Sub. C. Vol 30%	346,43	242,50	103,93	779,47	1039,30	173,22
Ad. C. Vol 30%	435,35	334,89	100,47	753,50	1004,66	217,68

Tabela 14 – Traços recalculados em volume por m³ de concreto

	Cim. (L)	Ad (L)	Agl (L)	M es aglomer (Kg/L)	vol Areia (L)	vol Brita (L)	Água (kg)
Referência	117,11		117,11		302,06	404,29	176,54
Sub. metacaulim	105,14	14,09	119,23	2,95	301,34	403,32	176,11
Ad. Metacaulim	115,48	13,93	129,40	2,69	297,86	398,66	191,49
Sub. S. Ativa	104,93	16,12	121,05	2,90	300,72	402,48	175,75
Ad. S. Ativa	115,24	15,94	131,18	2,65	297,25	397,85	191,10
Sub. S.C. Arroz	104,88	16,57	121,45	2,89	300,58	402,30	175,67
Ad. S.C. Arroz	115,19	16,38	131,57	2,64	297,12	397,67	191,01
Sub. F. Quartzo	105,20	13,55	118,75	2,97	301,50	403,53	176,21
Ad. F. Quartzo	115,54	13,40	128,94	2,70	298,02	398,87	191,59
Sub. C. Vol 10%	104,73	17,99	122,72	2,86	300,14	401,72	175,42
Ad. C. Vol 10%	115,02	17,78	132,81	2,61	296,69	397,10	190,74
Sub. C. Vol 30%	80,43	53,30	133,73	2,59	296,38	396,68	173,22
Ad. C. Vol 30%	111,07	51,52	162,60	2,06	286,50	383,46	217,68

Para a correta interpretação dos dados referente à profundidade de carbonatação e seus respectivos coeficientes de carbonatação é preciso compreender algumas mudanças que ocorreram nas proporções de materiais do concreto com a utilização das adições minerais. Primeiramente, todas as adições minerais utilizadas têm características diferentes entre si. Dentre elas, área específica BET, formato dos grãos, potencial de atividade pozzolânica e massa específica.

Neste estudo todos os traços tiveram uma variação da massa de adição em função da massa de cimento em teor de 10%. A cinza volante, além dos 10%, também foi utilizada no teor de 30%. No entanto, como a massa específica de cada adição mineral é diferente e a substituição ou adição foi efetivada em massa, é natural que existam diferenças no volume de pasta entre os concretos estudados.

Basicamente quando se retira uma porção de cimento e coloca-se outro material com massa específica menor, o volume total de concreto aumenta, e por consequência, muda-se o volume de aglomerante para cada traço estudado. Tomando por base um cimento Portland com massa específica de 3.090 kg/m³ e um concreto com consumo de 353 kg/m³, ao se substituir 10% da massa, retira-se 35,3 kg de cimento, equivalente a 0,011m³. A mesma massa de cinza volante, com massa específica de 1.950 kg/m³, passa

a ocupar $0,018 \text{ m}^3$. Logo haverá uma variação de $0,007 \text{ m}^3$ a mais de material aglomerante. Por consequência, esse aumento no volume de aglomerante total faz com que aconteça uma redistribuição volumétrica em todas as frações do concreto, realizando um acréscimo no teor de aglomerante e uma redução da quantidade de areia e brita em função do volume unitário. Em função deste raciocínio, é possível verificar, na Figura 28, as variações do volume do aglomerante.

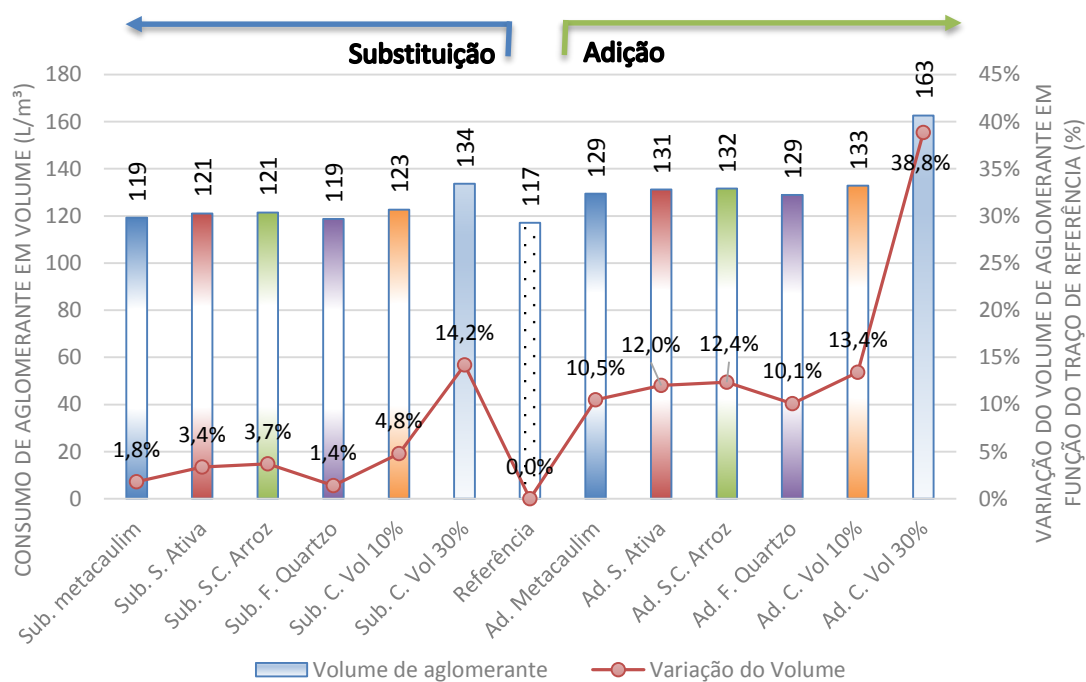


Figura 28 – Variação do volume de aglomerante em função da utilização da adição mineral.

Em função dessa variação volumétrica, pequenas mudanças nas proporções reais dos materiais são verificadas, mostrando que embora tenham sido estabelecidas as proporções em massa para todos os concretos, o volume de hidróxido de cálcio em função do volume da adição mineral disponível para as reações de carbonatação não será a mesma para todos os concretos estudados em função da variação da quantidade de cimento para cada traço.

A disponibilidade de material pode ser avaliada pela proporção entre o volume de cimento e o volume de adição, que está representado na Figura 29.

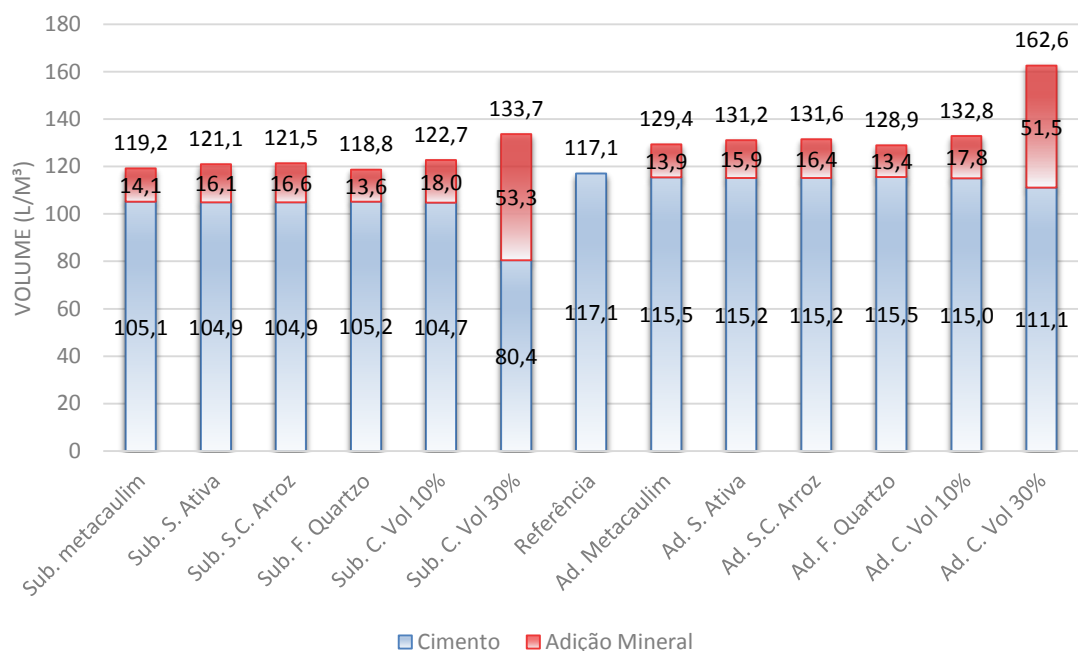


Figura 29 – Variação do volume de cimento e do volume de adição.

Para cada traço foram moldados 15 corpos de provas (CP), sendo 3 destinados ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias e 3 à absorção capilar aos 56 dias. Os 9 corpos de prova restantes foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada, sendo 1 corpo de prova rompido em cada semana de leitura de profundidade de carbonatação (1, 4, 8 e 12 semanas de exposição) e, os outros 5 CP's restantes foram utilizados para as leituras de resistividade elétrica ao longo do tempo (iniciais 7 e 28 dias de idade), após o sazonalamento e depois de transcorridas 1, 4, 8 e 12 semanas de exposição na câmara de carbonatação).

Na Figura 30 e Tabela 15 apresenta-se o esquema que fornece uma visão geral do experimento idealizado para este trabalho de pesquisa.



Figura 30 – Fluxograma do trabalho

Tabela 15 – Fluxograma do trabalho

Local	Idade	Tempo carbonatando	Atividade	CPs utilizados	CPs remanescentes
Cura em Câmara Úmida	0 dias	0 semanas	Moldagem	15CPs	15
	7 dias	0 semanas	Resistividade Elétrica	5CPs	
	28 dias	0 semanas	Resistividade Elétrica Resistência à Compressão Entrada no Sazonamento	5CPs -3CPs	12
Ambiente Climatizado	56 dias	0 semanas	Absorção Capilar	-3CPs	09
	126 dias	0 semanas	DRX	Fragmentos	
Carbonatação a Câmara Climatizada com 5% de CO ₂	49 dias	0 semanas	Entrada na Câmara de Carbonatação Resistividade Elétrica	5CPs	09
	56 dias	1 semana	Leitura com Fenolftaleína Resistividade Elétrica	-1CP 5CPs	08
	77 dias	4 semanas	Leitura com Fenolftaleína Resistividade Elétrica	-1CP 5CPs	07
	105 dias	8 semanas	Leitura com Fenolftaleína Resistividade Elétrica	-1CP 5CPs	06
	133 dias	12 semanas	Leitura com Fenolftaleína Resistividade Elétrica	-1CP 5CPs	05

A Tabela 16 resume as variáveis de estudo e de resposta que compõem o trabalho.

Tabela 16 – Resumo das variáveis que envolvem o estudo.

Tipos de variáveis do estudo	Variações executadas
Variáveis de estudo	<ul style="list-style-type: none"> • Adições (5 adições minerais + referência); • Modo de uso (adição ao cimento ou substituição parcial) – 1 nível (10%) – cinza volante - 2 níveis (10 e 30%).
Variáveis de resposta	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de carbonatação; • Coeficiente de carbonatação acelerada; • Resistência à compressão aos 28 dias; • Absorção por sucção capilar aos 56 dias (antes da carbonatação); • Resistividade elétrica (saturada aos 7 e 28 dias, posteriormente com os concretos em 60% de umidade depois do sazonalamento e na 1ª, 4ª, 8ª e 12ª semanas após a carbonatação acelerada); • Análise qualitativa do teor remanescente de portlandita na idade de 126 dias - DRX;

Todos os corpos de prova utilizados neste trabalho foram executados com formas metálicas cilíndricas de $\phi 10 \times 20$ cm.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

3.3.1 Carbonatação acelerada

O procedimento empregado neste trabalho foi realizado em uma câmara de carbonatação, mostrada na Figura 31, com controle automatizado de teor de dióxido de carbono, umidade relativa e temperatura do ambiente interno. O volume interno desta câmara é de 1 m³.



Figura 31 – Câmara de carbonatação do laboratório LAME/DCC da UFPR.

Com os dados do levantamento exposto na Tabela 3, não foi possível determinar uma concentração de CO_2 preponderante entre os pesquisadores, mas foi utilizado o teor de $5 \pm 1\%$, a fim de não gerar modificações acentuadas na microestrutura do concreto, como a carbonatação de compostos não hidratados, efeito que não ocorre na carbonatação natural (PAULETTI, 2004).

A umidade relativa foi estabelecida em $60 \pm 0,5\%$, a fim de reduzir o tempo de ensaio aproveitando o teor de umidade com o máximo de eficiência para carbonatação.

A temperatura foi estabilizada em $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$, apesar de não se ter encontrado registros de outros ensaios de carbonatação com esta temperatura. A justificativa para a temperatura utilizada está baseada na indisponibilidade técnica momentânea do equipamento operar em menor valor, já que há necessidade de manutenção do sistema de refrigeração. A impossibilidade de intervenção no equipamento no transcorrer do período de desenvolvimento desta pesquisa condicionou o seu uso na temperatura de 40°C .

Apesar deste incidente, Neville (1997); Maekawa *et al.* (2003) e Pina (2009) citam que variações de temperatura pouco influenciam na velocidade de carbonatação. Este fato indica que os dados obtidos neste trabalho não foram significativamente influenciados pelo nível de temperatura adotado.

3.3.2 Profundidade de carbonatação determinada por indicadores químicos

As leituras da frente de carbonatação foram realizadas pela aspersão de indicadores químicos, a base de fenolftaleína sobre as superfícies de concreto recém rompidas. Desse modo, foi possível visualizar o concreto não carbonatado com uma cor vermelho carmim.

Para preparar o indicador de fenolftaleína adiciona-se dez gramas de reagente à 700 ml de etanol, diluindo todo o sólido em etanol puro. Após a dissolução total, adiciona-se 300 ml de água destilada, conforme as recomendações da RILEM 1988 CPC-18. (CASTRO, 2003; CASCUDO & CARASEK, 2011).

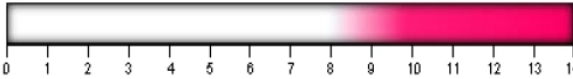
Indicador de pH	Intervalo de mudança de cor	Preparo de Solução
Fenolftaleína	 <p>Incolor/vermelho carmim Faixa de pH 8,3 – 10,0</p>	Dissolver 10g de reagente em 700ml de etanol e depois diluir em 300 ml de água destilada

Figura 32 – Indicador de pH usados no estudo da carbonatação adaptado de CASTRO (2003).

Com corpos de provas cilíndricos, as leituras com paquímetro foram realizadas a partir da face externa em direção ao centro da circunferência, conforme ilustrado na Figura 33. Para cada corpo de prova rompido foram realizadas seis leituras, uma a cada 60°, se uma das leituras estivesse em região com agregado ou falha de concretagem que aumentasse a leitura de profundidade de carbonatação, esta leitura era realizada imediatamente ao lado, excluindo a leitura viciada.

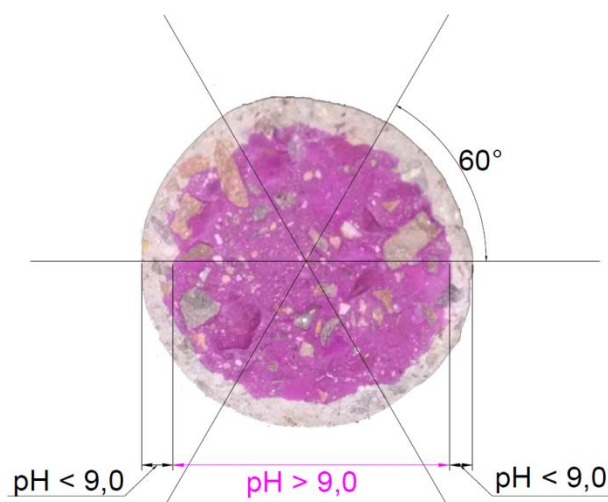


Figura 33 – Esquema de leitura de profundidade de carbonatação.

Para se obter os coeficientes de carbonatação foram analisadas as leituras de profundidade de carbonatação nas idades de 1, 4, 8 e 12 semanas. Essas leituras foram ajustadas ao modelo de Tuutti (1982) mostrado na equação 10, onde e_c é a espessura carbonatada (mm), k_{co_2} (mm.semana^{-0,5}) é coeficiente de carbonatação a ser calculado e t é o tempo, em semanas.

$$e_c = k_{co_2} \sqrt{t} \quad \text{Equação 10}$$

No trabalho de Possan (2010), foram apresentados vários modelos de vida útil para o processo de carbonatação. No entanto, vários desses modelos necessitam de certos parâmetros que só podem ser obtidos com equipamentos específicos. De maneira geral, todos os modelos são modificações do modelo simplificado de Tuutti (1982), sendo este o modelo escolhido para essa pesquisa.

A carbonatação, segundo o modelo de Tuutti (1982), tem um avanço mais intenso nas primeiras idades com uma redução da velocidade de carbonatação ao longo do tempo, assim como apresentado na Figura 34, com dados fictícios afim de exemplificar o método numérico.

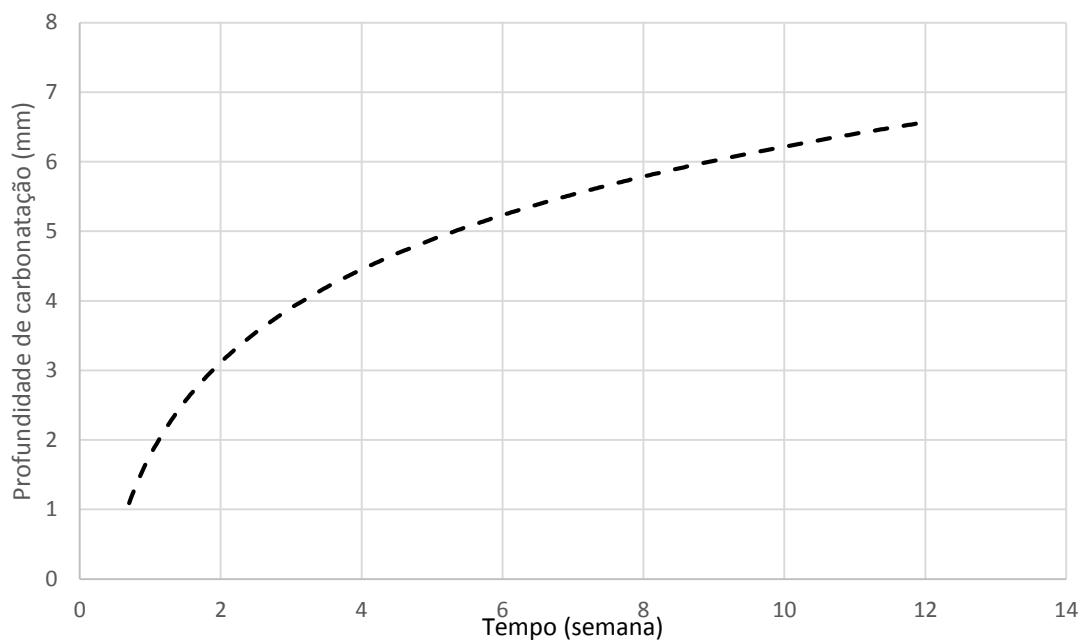


Figura 34 – Relação entre a profundidade de carbonatação acelerada e o tempo real.

Para que a visualização e comparação de múltiplos resultados fosse facilitada, essa equação foi linearizada através da modificação do eixo X (tempo). Colocando o eixo da abscissa em função de sua raiz quadrada é possível representar o avanço da carbonatação por uma reta, e o coeficiente angular dessa reta será o k_{CO_2} da equação da difusão de Tuutti, assim como apresentado na Figura 35.

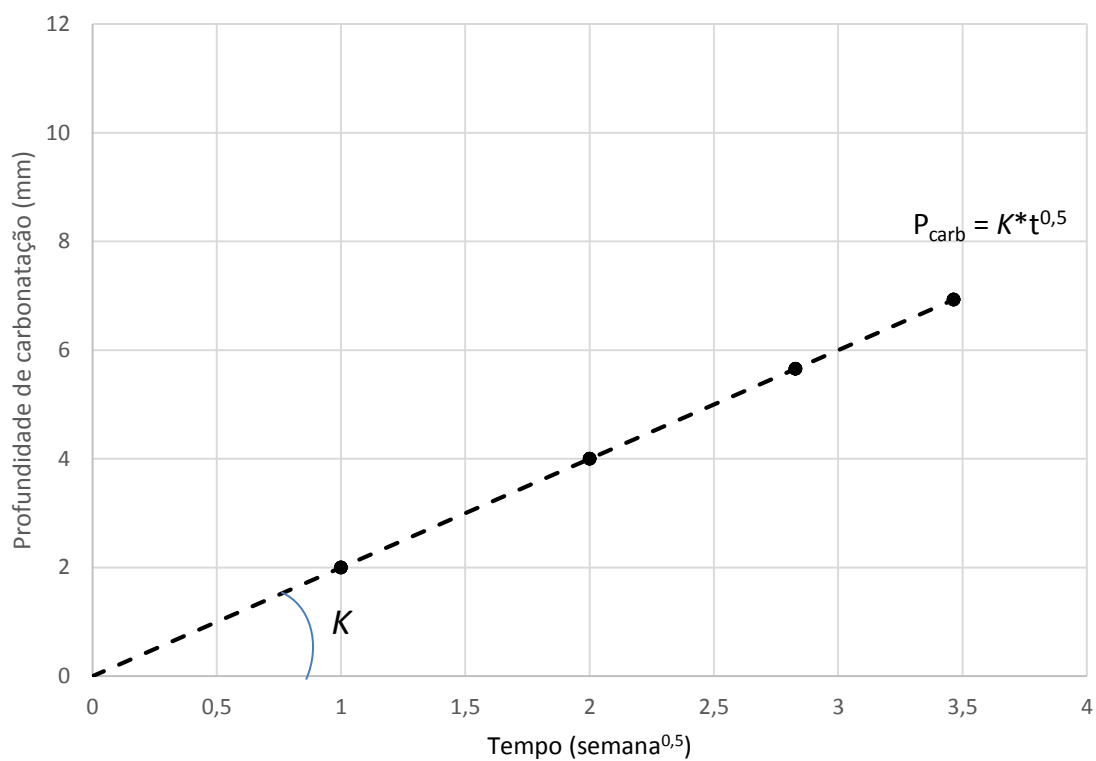


Figura 35 – Profundidade de carbonatação linearizada.

3.3.3 Absorção de água por capilaridade

Conforme a NBR 9.779 (2012), este procedimento visa colocar os corpos de prova em contato com uma lâmina de 5 mm de água. Desse modo, a absorção de água ocorre apenas pela face inferior e circular dos corpos de prova cilíndricos de Ø 10 x 20 cm e as faces laterais ficam em contato direto com o ar, não sendo aplicadas resinas impermeabilizantes.

As amostras, previamente ao ensaio, foram secas em estufa em temperatura de 105 ± 5 °C até a constância de massa. Considerou-se que a massa era constante quando a diferença de massa entre as pesagens com um intervalo de duas horas foi inferior a 0,5% do menor valor. Posteriormente, os corpos de prova foram resfriados à temperatura de 23 ± 2 °C e a massa seca (m_s), em gramas, foi determinada, conforme estabelece a NBR 9.779 (2012).

Durante o ensaio, a massa foi medida nos intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, sendo previamente enxugados para que a água superficial não fosse considerada, determinando, assim, a massa do corpo de prova juntamente com a massa de água contida nos poros do concreto, dita massa saturada (m_{sat}), em gramas. Terminando cada pesagem, os corpos de prova foram novamente expostos à lâmina de água até o final do ensaio, como estabelecido pela NBR 9779 (2012).

A absorção por capilaridade foi calculada de acordo com a equação 11.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- C é a absorção de água por capilaridade – g/cm²
- m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova com uma das faces na lâmina de água de 5 mm, a cada intervalo – g
- m_s é a massa do corpo de prova logo após atingir a temperatura de 23 ± 2 °C – g
- S é área da seção transversal em contato com a lâmina de água – cm²

Assim como na carbonatação, o comportamento da absorção capilar, apresentado na Figura 36, também se enquadra em uma função logarítmica, sendo diferenciado pela absorção inicial no instante em que o material seco é exposto à água, absorvendo inicialmente uma quantia de água.

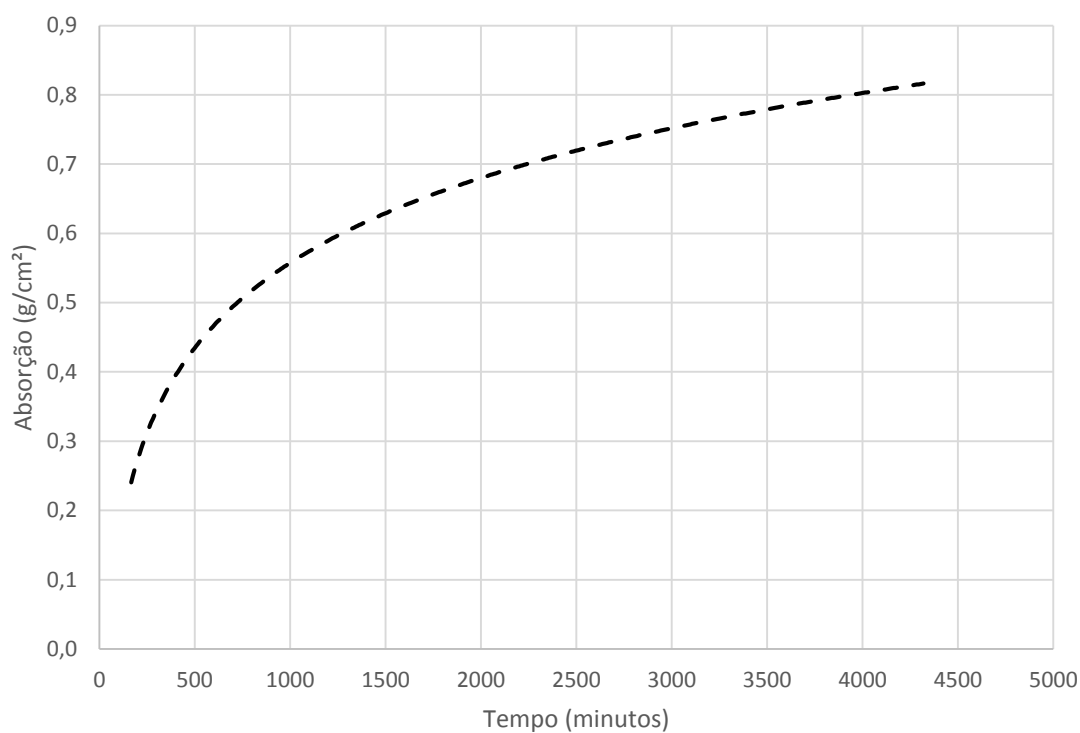


Figura 36 – Absorção capilar

De modo a facilitar a visualização dos resultados e a correlação entre eles, foi executado o procedimento proposto pela RILEM TC 116-PCD que lineariza o fenômeno pela modificação do eixo das abscissas em função da raiz do tempo. O coeficiente de sorvidade (K_s) é representado pelo coeficiente angular da reta, enquanto a absorção inicial está relacionada ao coeficiente linear, conforme observado na Figura 37.

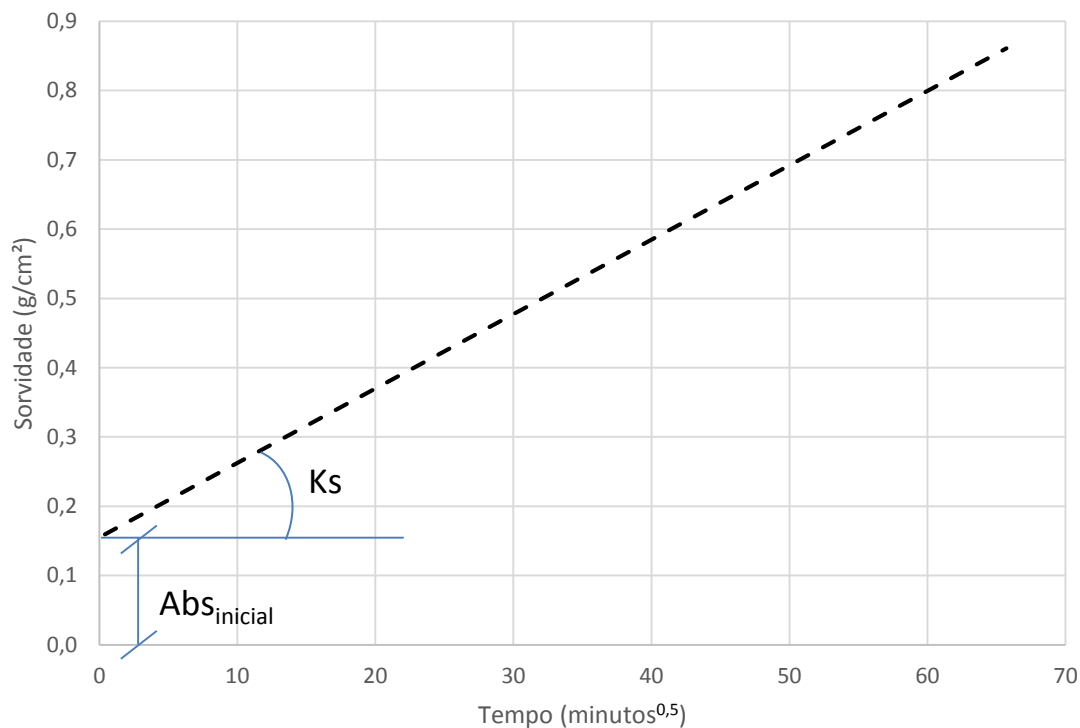


Figura 37 – Representação do coeficiente de sorvidade e absorção inicial.

3.3.4 Resistividade elétrica

Foi utilizado o método Wernner de leitura de resistividade, também conhecido como método dos 4 eletrodos. Este procedimento é realizado pela aplicação de uma corrente elétrica pelos eletrodos externos, enquanto os eletrodos internos realizam uma leitura da diferença de potencial para estipular a resistividade do material, assim como visualizado na Figura 38. No aparelho utilizado, o Resipod da fabricante Proceq, o espaçamento padrão entre os eletrodos é de 50 mm, e a corrente aplicada varia de 10 a 200 μA .

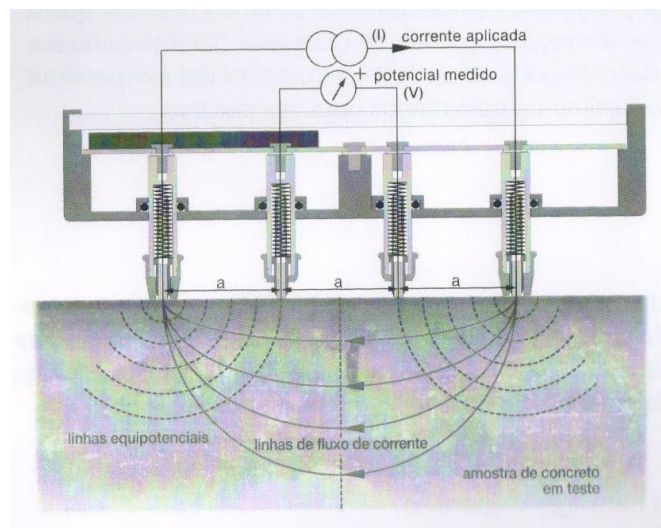


Figura 38 – Esquema do campo magnético dentro do concreto (manual Proceq).

Cinco corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm de cada traço foram separados e identificados logo após a desmoldagem. Esses mesmos cinco corpos de prova foram identificados e em todos os ensaios de resistividade foram utilizadas as mesmas amostras nas diferentes condições do estudo. As leituras foram realizadas aos 7 dias e aos 28 dias, enquanto as amostras estavam totalmente saturadas. Após o sazonalamento, quando as amostras ficaram com 60% de umidade interna, a resistividade elétrica tende a subir, pois a quantidade de eletrólito (água) reduziu, por consequência, a resistividade elétrica aumentou. Então, foi feita uma leitura quando as amostras entraram na câmara climatizada, e foram feitas leituras após 1, 4, 8 e 12 semanas de carbonatação, todas com a umidade relativa interna em 60%. Desta maneira, as leituras de resistividade foram separadas em duas situações diferenciadas, totalmente saturadas, e com uma quantidade significativa de ar interna.

Embora a resistividade tenha sido medida nos mesmos corpos de prova desde o início do programa experimental, é necessário salientar que conforme foram passando as etapas de cura e procedimentos de sazonalamento, a resistividade foi mensurada de formas diferentes, dependendo da idade. Primeiramente, as leituras de resistividade foram realizadas com os corpos saturados nos primeiros 7 e 28 dias usando o equipamento com os contatos metálicos sobre molas. Na etapa após o sazonalamento, as leituras foram realizadas com a umidade relativa do concreto próxima a 60% durante o ensaio de carbonatação acelerada. No entanto, nessa segunda etapa após o sazonalamento e durante a carbonatação acelerada, não era possível realizar a saturação dos corpos de provas, visto que esse procedimento iria dificultar o avanço da frente de carbonatação pela saturação dos poros. Com essa umidade interna o aparelho de resistividade não era capaz de realizar

a leitura. Desse modo, foi utilizado o sistema de contatos com esponjas saturadas, fornecidas pelo fabricante, de maneira que a umidade que penetra no corpo de prova é a mínima possível para realizar a leitura de resistividade.

Foram realizadas ao total 30 leituras por traço a cada dia de ensaio, 6 leituras por corpo de prova para cada um dos 5 CPs que foram acompanhados desde o início do estudo. As leituras iniciaram no 7º dia após a concretagem, aos 28 dias, ao entrar na câmara de carbonatação e após 1, 4, 8 e 12 semanas em carbonatação acelerada.

3.3.5 Difratometria de raios-X (DRX)

O intuito foi usar a técnica como parâmetro de monitoramento da evolução do consumo de portlandita ocasionado pelas adições estudadas.

A análise por difração de raios-X identifica qualitativamente as fases químicas dos minerais constituintes das amostras, a partir da interação de raios-X que difratam, caracterizando cada ângulo de incidência. O resultado se apresenta em um gráfico (difratograma) que apresenta picos característicos da estrutura cristalina de cada espécie química (CINCOTTO e COSTA, 2007).

O preparo das amostras para a coleta dos difratogramas foi realizado pela prensagem manual no porta-amostra (Figura 39).



Figura 39 - Amostras no porta amostra de alumínio (GOBBI, 2014).

Em seguida, foram expostas aos raios-X no equipamento RIGAKU Ultima IV X-ray diffractometer. A medida foi realizada entre 5° e $75^\circ 2\theta$, com passo angular de $0,02^\circ 2\theta$ e tempo por passo de 1 segundo. A análise utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV / 30 mA e fenda divergente de 1° .

As amostras das argamassas dos concretos foram retiradas com o auxílio de marreta e talhadeira, posteriormente moídas com pistilo em almofariz, ambos cerâmicos, e, foram secas em microondas durante 9 minutos, conforme as recomendações de Cabrera (2000). Após a secagem, as amostras foram armazenadas em Eppendorf de 2 mL e estocadas em recipiente polimérico contendo sílica gel.

As análises das argamassas moídas dos concretos objetivam identificar, de forma qualitativa, a presença de portlandita e permitir uma análise comparativa entre as reservas alcalinas dos concretos a partir da comparação da intensidade do pico principal da portlandita, localizado na região de $34,2^\circ 2\theta$ nos respectivos difratogramas. Por este motivo será utilizada apenas uma pequena porção do gráfico gerado pelo ensaio, como ilustrado na Figura 40.

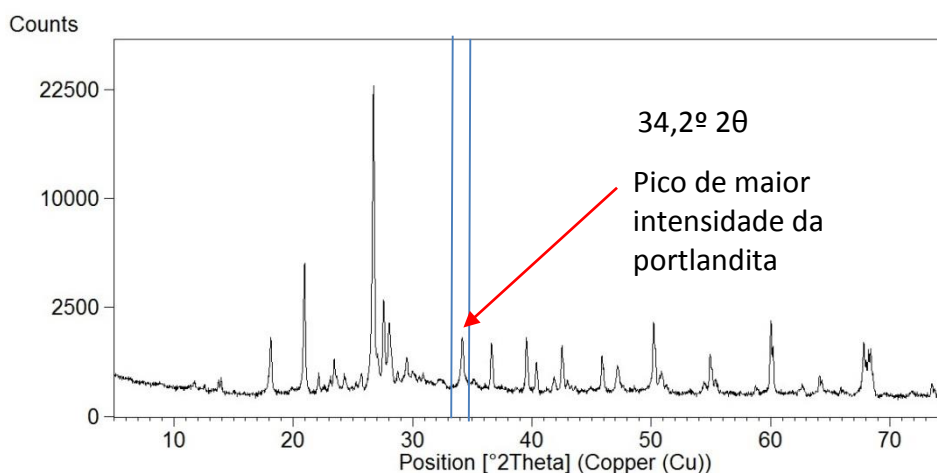


Figura 40 – DRX da amostra de argamassa do concreto de referência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo estão descritos os resultados dos ensaios propostos no planejamento experimental com as respectivas discussões acerca dos fenômenos observados. Estão dispostos os resultados ordenados da seguinte forma: coeficientes de carbonatação; ensaios de resistência à compressão; absorção de água por sucção capilar; variações no volume de pasta e quantidade de portlandita; difratometria de raios X; e resistividade elétrica.

4.1 RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

A evolução da carbonatação do concreto de referência, sem adição mineral, é apresentada na Figura 41. O coeficiente de carbonatação que caracteriza este concreto é de $1,46 \text{ mm.semana}^{-0,5}$, determinado a partir da linha de tendência linear aplicada sobre os resultados experimentais. O coeficiente de determinação (R^2) igual ou superior a 0,90 indica que o comportamento do material exposto à ação do anidrido carbônico, em ensaio acelerado, é adequadamente representado pelo modelo linear obtido por regressão.

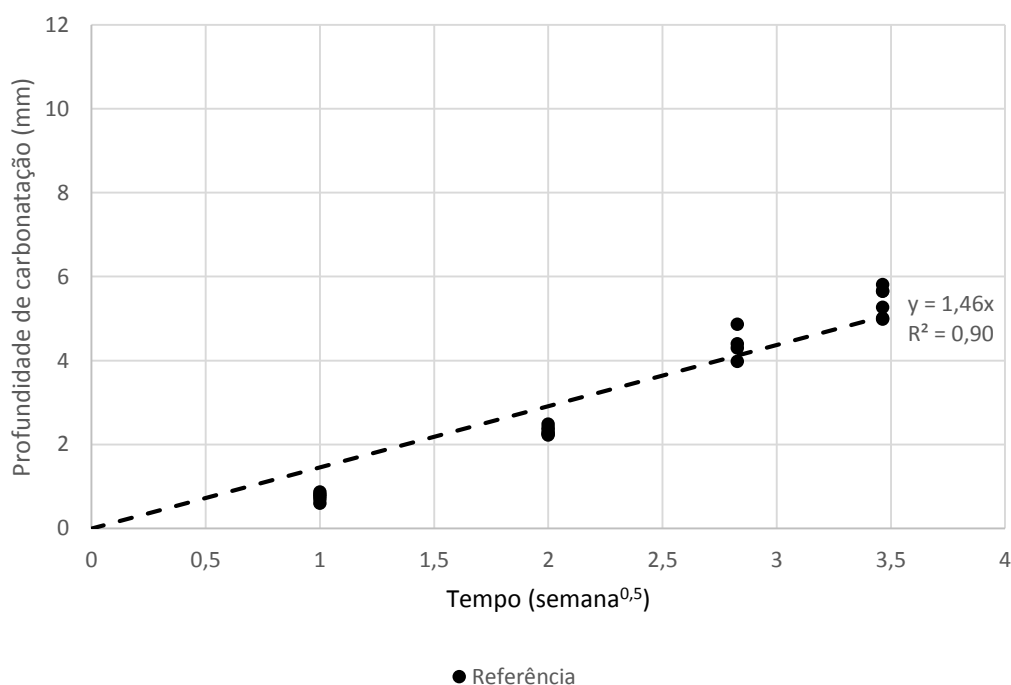


Figura 41 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo para o traço de referência.

A mesma metodologia de análise foi realizada para todos dados de carbonatação dos diferentes concretos, obtendo-se, assim, os respectivos coeficientes de carbonatação. O concreto com a adição de sílica ativa (10% em massa) foi o único a apresentar coeficiente de determinação (R^2) inferior a 0,90. De fato, neste concreto a carbonatação não foi observada após 1 semana de exposição à condição acelerada e, a partir desta idade, a profundidade carbonatada atingiu, aproximadamente 1,5 mm após 12 semanas de exposição. Assim sendo, a medida da região carbonatada torna-se passível de erro significativo em virtude da dificuldade de realização precisa da profundidade carbonatada, o que impacta no coeficiente de determinação do modelo linear aplicado sobre os dados experimentais.

Na Figura 42 estão apresentados os coeficientes de carbonatação (k) calculados para cada concreto contendo as diferentes adições minerais em função do modelo de Tuutti (1982). Em geral, os coeficientes de carbonatação (k) aumentaram com o uso de adições minerais, com exceção do metacaulim e da sílica ativa, usadas como adição ao cimento. No caso do metacaulim adicionado ao concreto, o valor de k foi de 1,34 mm.semana^{-0,5}, o que representa uma redução de 8,0% em relação ao concreto de referência (1,46 mm.semana^{-0,5}). No caso da sílica ativa usada como adição ao cimento, o valor do coeficiente de carbonatação foi de 0,45 mm.semana^{-0,5}, uma redução de 69,0 % em relação à série de referência.

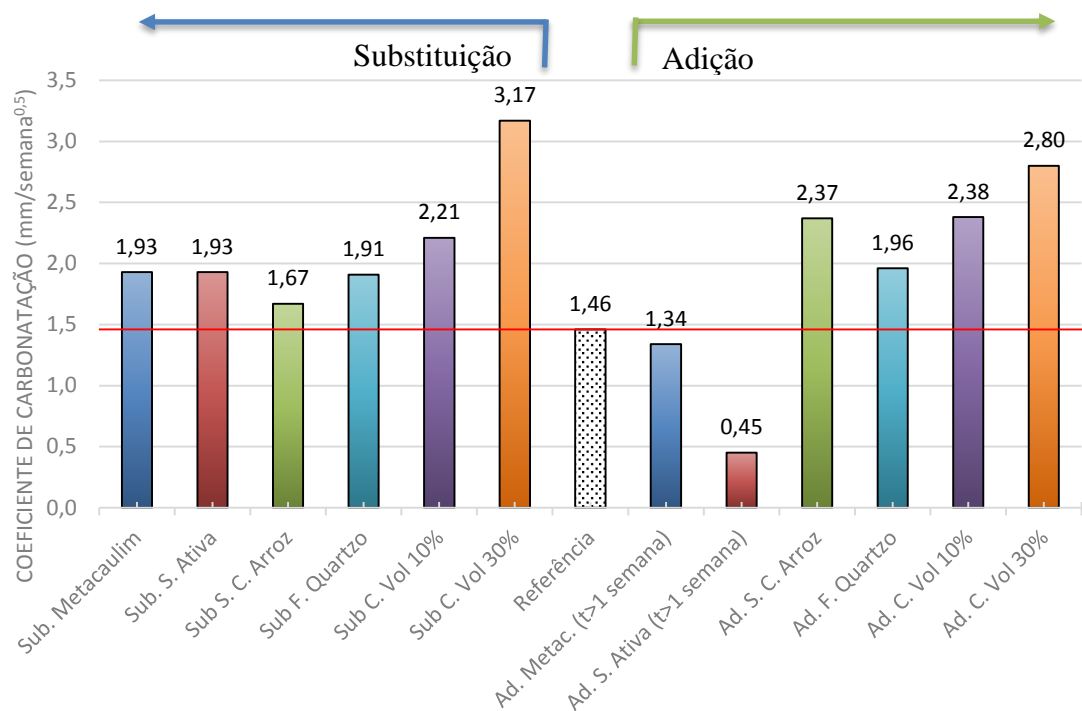


Figura 42 – Coeficiente de Carbonatação dos concretos estudados, a esquerda substituição e a direita adição.

É importante salientar que utilizar os coeficientes deste trabalho para realizar um cálculo de vida útil de uma estrutura não é indicado devido às razões a seguir: 1 – os valores de K_{CO_2} foram obtidos em condições de carbonatação acelerada; 2 – os concretos foram testados em idade pouco avançada, em que as atividades pozolânicas possivelmente não tinham sido finalizadas completamente.

Assim, embora a carbonatação e as alterações pozolânicas sejam atividades de longa duração, estes ensaios foram conduzidos de forma acelerada tanto no que se refere à carbonatação, quanto ao processo de cura que foi conduzido de forma ideal, 28 dias de cura a 100% de umidade relativa. Porém, é verdade que um tempo de cura mais prolongado poderia favorecer em maior grau o desempenho das séries com adição de materiais pozolânicos porque a atividade pozolânica iria apresentar maior grau de atuação, assim como defendido por Pauletti *et al.* (2007). Contudo, como todos os concretos desse trabalho tiveram exatamente as mesmas condições de exposição e de acondicionamento, esses coeficientes de carbonatação são adequados para a comparação entre os traços desse estudo.

A Figura 43 mostra a relação entre a profundidade de carbonatação e o tempo de exposição na câmara de carbonatação, embora seja os mesmos dados apresentados na

Figura 42, desta forma é mais fácil visualizar as diferenças entre as amostras ao longo do tempo, assim, evidenciando as diferenças nas carbonatações ao longo do tempo. Avaliando este gráfico, é possível verificar que todos os concretos dosados em substituição parcial ao cimento tiveram a resistência a carbonatação afetada negativamente, uma vez que em todos os coeficientes de carbonatação são maiores que o do concreto de referência.

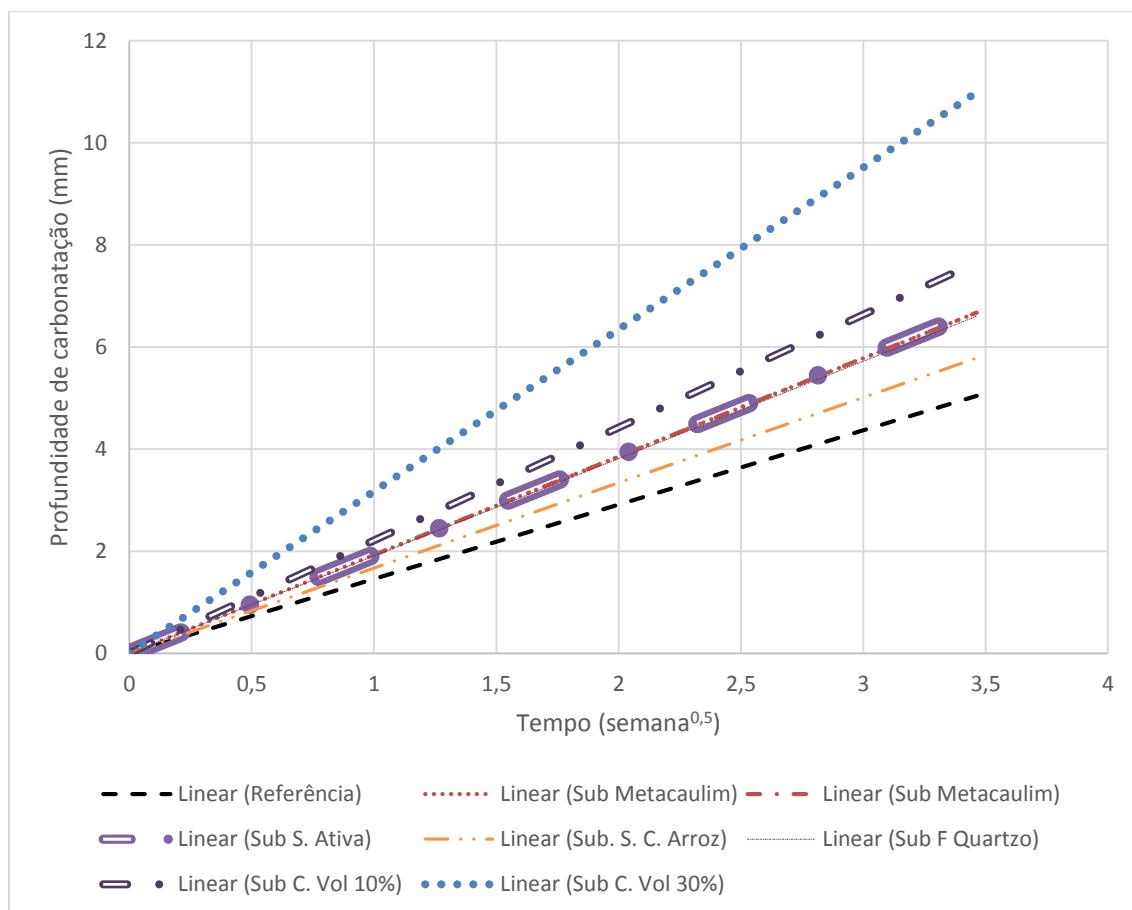


Figura 43 – Profundidade de Carbonatação para todas as substituições.

Os traços dosados em adição ao cimento, com exceção da sílica ativa e do metacaulim, também tiveram a resistência a carbonatação reduzida, assim como visto na Figura 44. Esta situação favorável às duas adições citadas pode ser atribuída ao efeito da alta atividade pozolânica, que refinou os poros restringindo o transporte de massa na microestrutura do concreto, assim como visualizado por Barata (1998) e Figueredo *et al.* (2014).

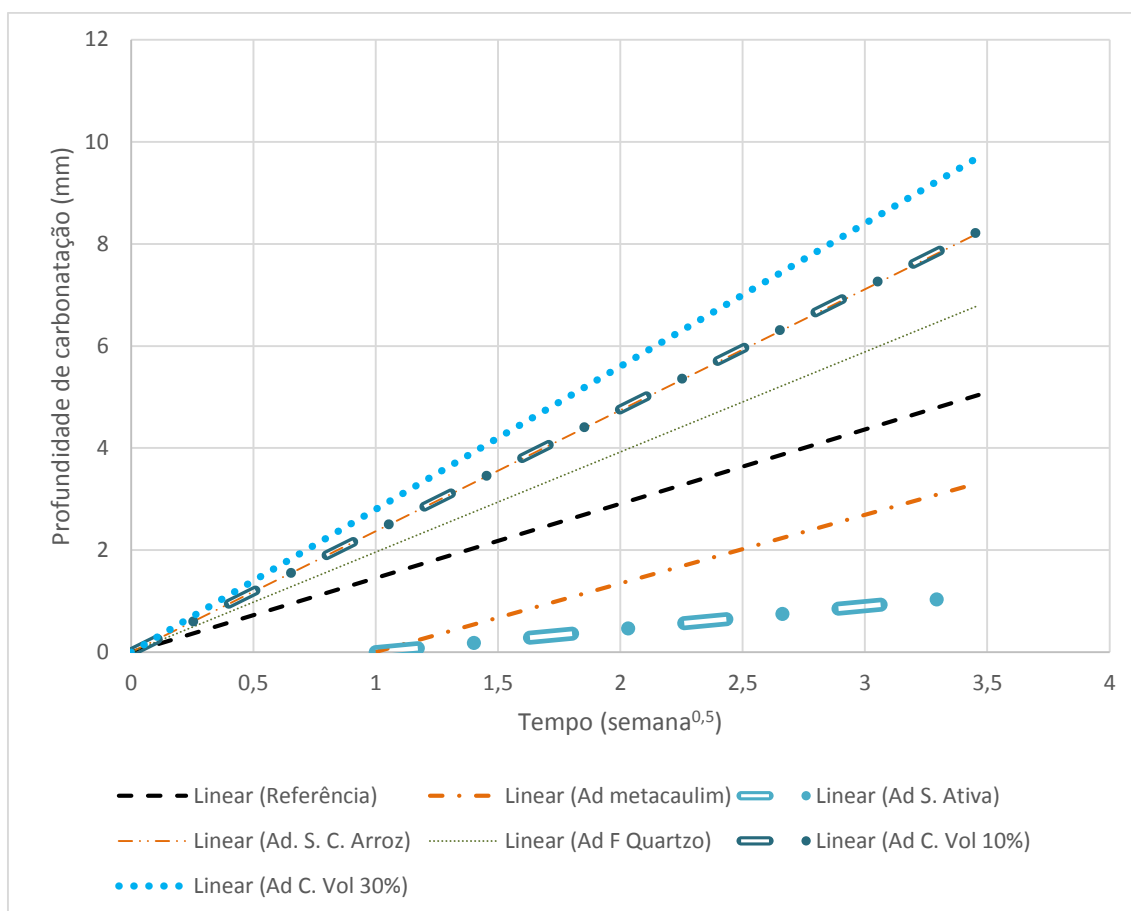


Figura 44 – Profundidade de Carbonatação para todas as adições.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de todos os traços podem ser observados na Figura 45.

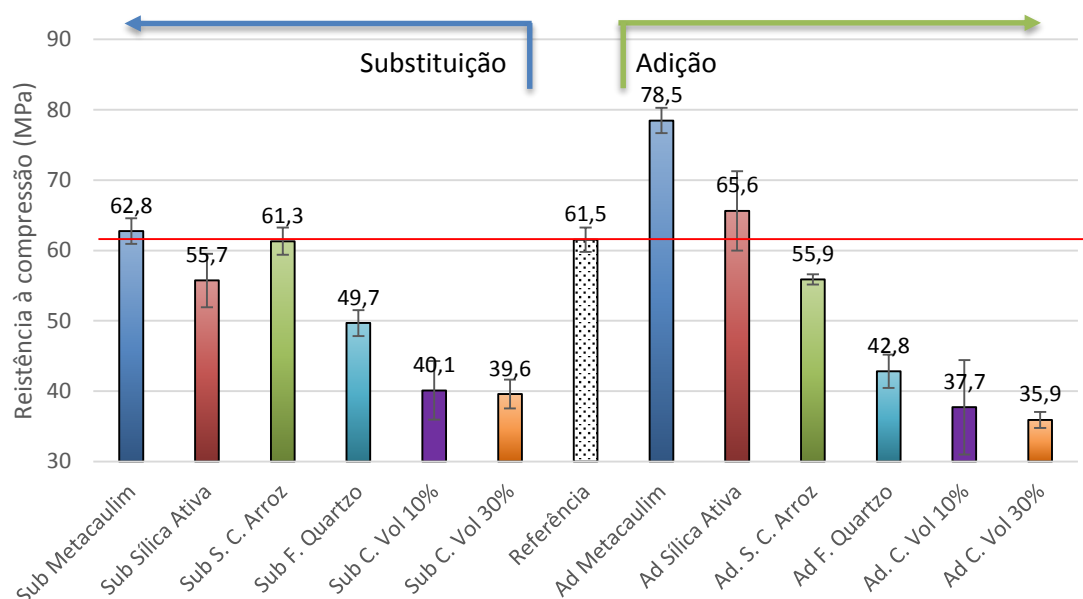


Figura 45 – Resistência à compressão aos 28 dias.

Nos traços confeccionados neste estudo, o traço de substituição de metacaulim e sílica ativa, não tiveram acréscimos na resistência à compressão comparados ao traço de referência. Analisando os dados de resistência à compressão é possível visualizar que os traços moldados com fíler de quartzzo e cinza volante, tanto na substituição como na adição foram considerados estatisticamente iguais segundo o teste tukey apresentado na Figura 46 a Figura 48. O teste Tukey realiza uma comparação par a par, dizendo se as duas amostras são estatisticamente iguais ou não. Quando o par de amostras é igual estatisticamente, o valor zero estará dentro do intervalo de confiança, ou seja, o intervalo de confiança cruzará o eixo x. Logo, se o intervalo de confiança não cruzar o eixo das abscissas as amostras são estatisticamente diferenciadas entre si.

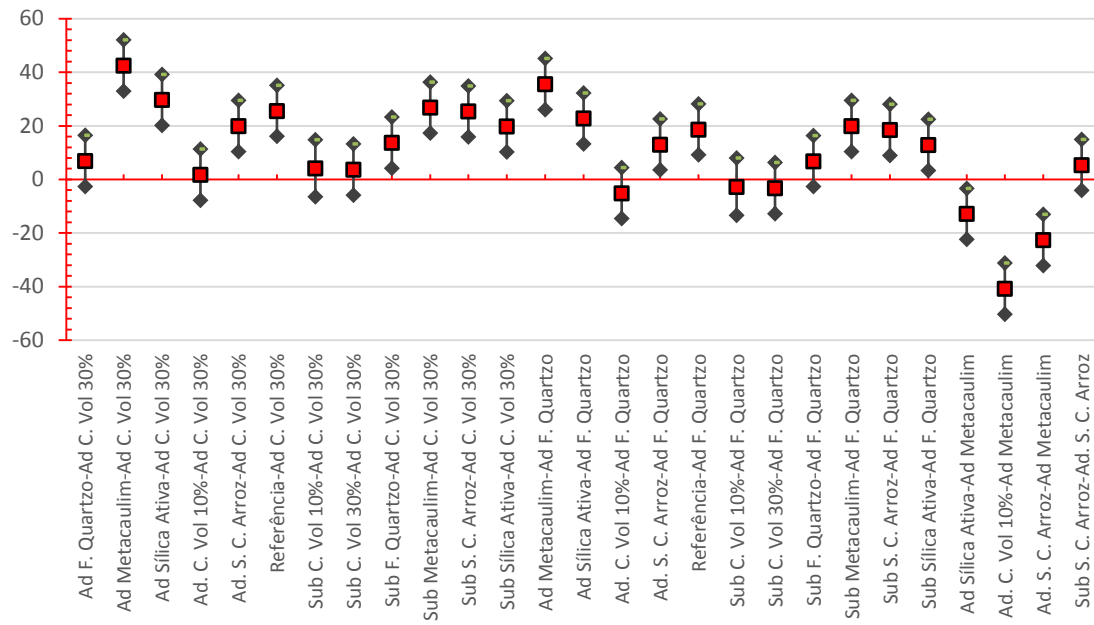


Figura 46 – Teste Tukey das resistências à compressão aos 28 dias parte 1/03.

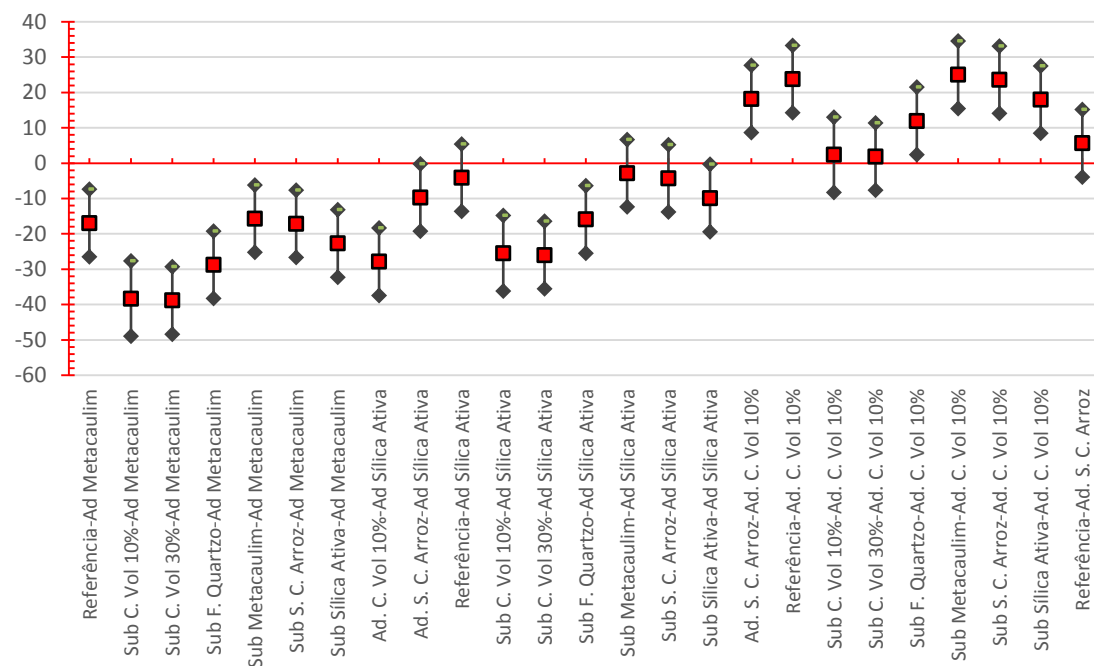


Figura 47 - Teste Tukey das resistências à compressão aos 28 dias parte 2/3.

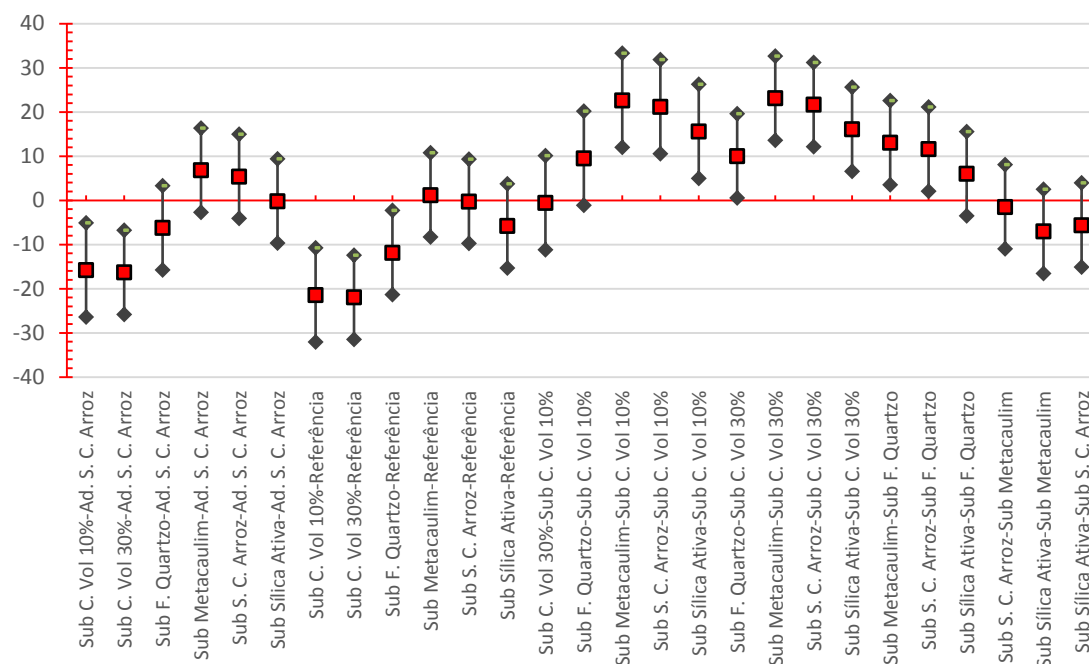


Figura 48 – Teste Tukey das resistências à compressão aos 28 dias parte 3/3.

Conforme o teste o teste Tukey, os traços dosados em substituição e em adição com sílica ativa, sílica de casca de arroz, e o traço de substituição de metacaulim são estatisticamente iguais em relação a resistências à compressão axial. Neste grupo também se enquadra o traço de referência com resistência média à compressão em 61,5 MPa. O traço com metacaulim adicionado ao cimento teve uma resistência à compressão média de 78,5 MPa se categorizando estatisticamente diferente de todos os demais traços que compõem este trabalho, conforme os critérios do teste Tukey.

Vale salientar que as leituras de resistências à compressão utilizadas neste estudo são apenas com 28 dias de idade. No entanto, pesquisadores como Neville e Brooks (2013) defendem que concretos com adições minerais devem ter suas leituras de resistências a compressão em idades mais avançadas, visto que algumas adições reduzem a velocidade de hidratação, mas aumentam a resistência em idades mais avançadas.

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR

A absorção capilar dos concretos estudados foi apresentada em função do índice de sorvidade, conforme apresentado no capítulo anterior. Em geral, a maioria dos traços com adição mineral apresentaram redução na absorção capilar, com exceção dos traços

com cinza volante usada como adição ao cimento para as variações de 10 e 30% que tiveram um acréscimo na absorção capilar, assim como visto na Figura 49, o que pode ser consequência do maior volume de água utilizado no traço unitário como pode ser visto na Tabela 14 – Traços recalculados em volume por m^3 de concreto.

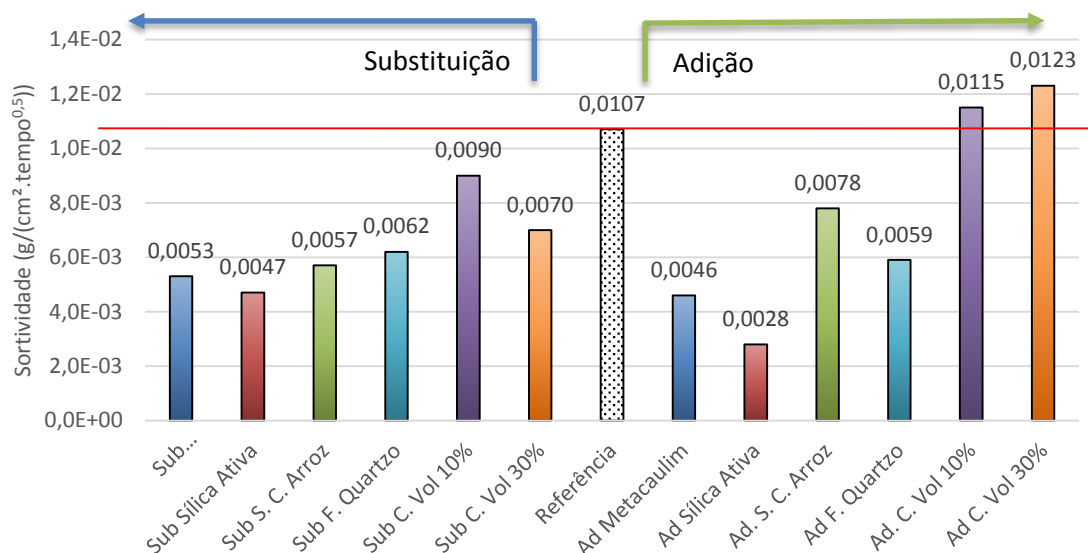


Figura 49 – Coeficiente de sorvidade dos concretos estudados

De acordo com Neville (2013), pelo ponto de vista da carbonatação, a redução da absorção capilar é um fator positivo para incrementar a resistência à carbonatação. De acordo com este conceito, pode-se considerar que quase todos os concretos deveriam apresentar melhor eficiência quanto a exposição à carbonatação, com exceção dos traços de adição de cinza volante para as variações de 10 e 30% que tiveram um acréscimo na absorção capilar. Este fato é apoiado estatisticamente pelo teste Tukey, na Figura 50 à Figura 52, onde é possível visualizar que a absorção capilar é estatisticamente diferentes ao traço de referência para os traços com 30 e 10 % de cinza de volante usada como adição ao cimento, sendo estes os concretos que tiveram a maior absorção capilar. O traço de adição de sílica ativa teve uma absorção estatisticamente menor que todos os concretos estudados. Os demais, não citados, foram considerados estatisticamente iguais entre si e se comparado ao concreto de referência, assim como apresentados pela Figura 50 à Figura 52 (sublinhados em Alaranjado).

Desse modo, também é possível caracterizar um grande grupo de concretos com comportamentos similares estatisticamente, composto pelo traço de referência, substituições de sílica ativa, fíler de quartzo, metacaulim, sílica de casca de arroz, 10 e

30% de cinza volante. Neste mesmo grupo também estão as adições de Sílica de casca de arroz, fíler de quartzo e metacaulim.

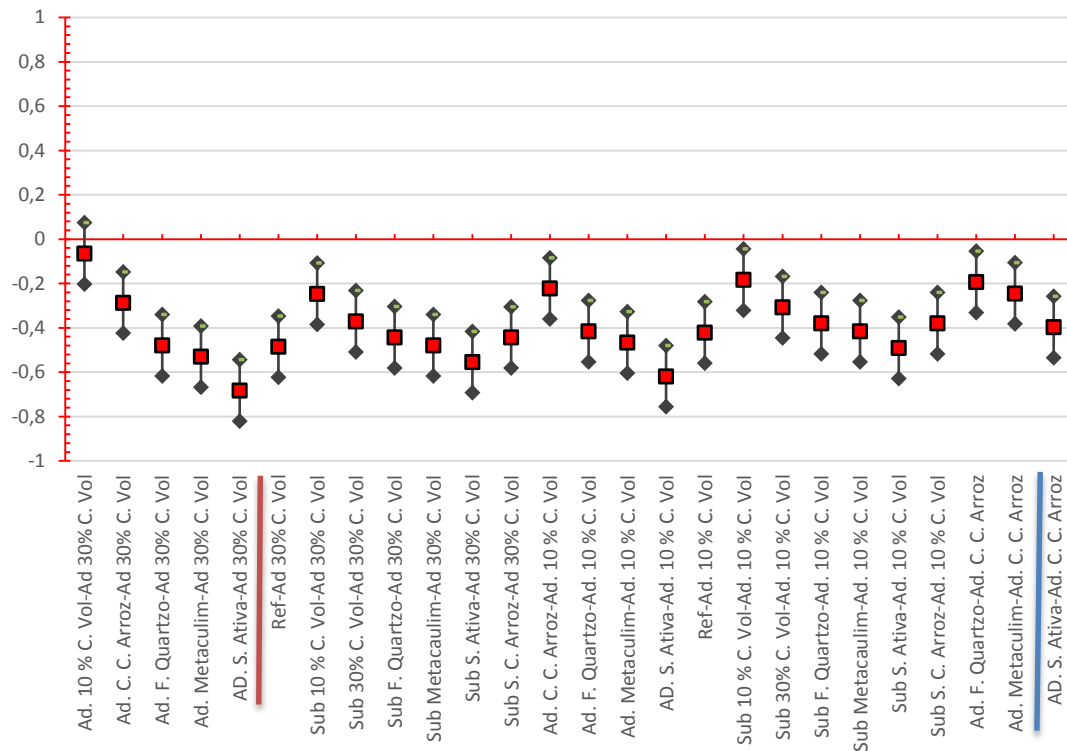


Figura 50 – Teste Tukey da absorção capilar com 72h de ensaio parte 01/03.

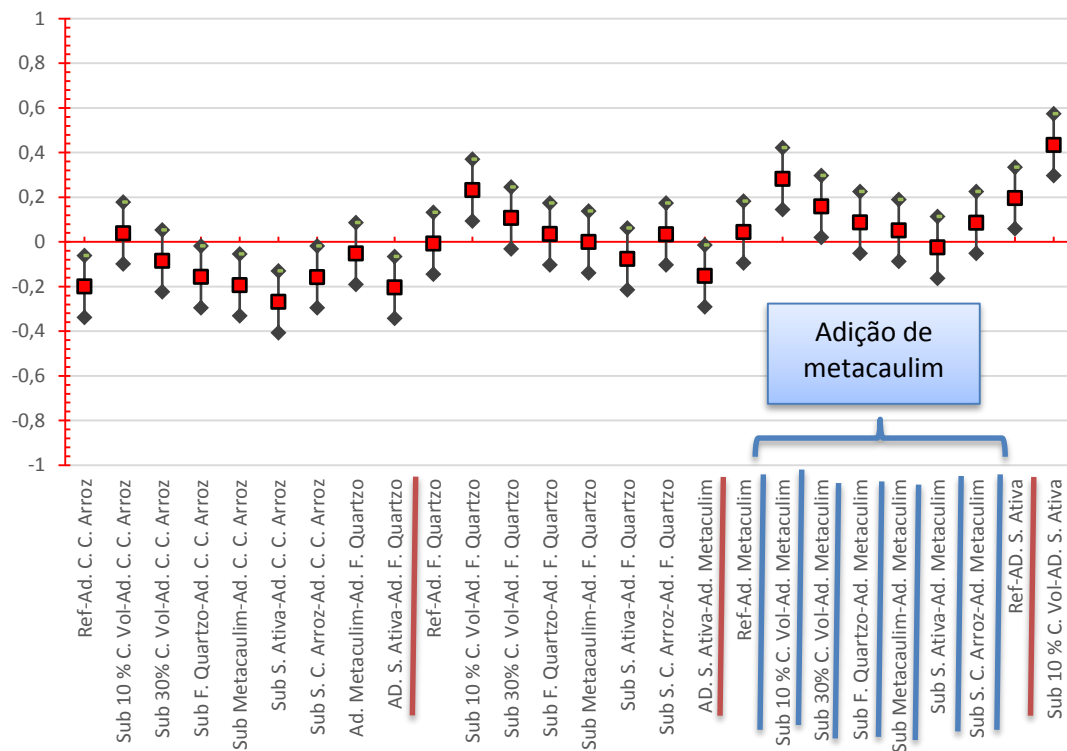


Figura 51 - Teste Tukey da absorção capilar com 72h de ensaio parte 02/03.

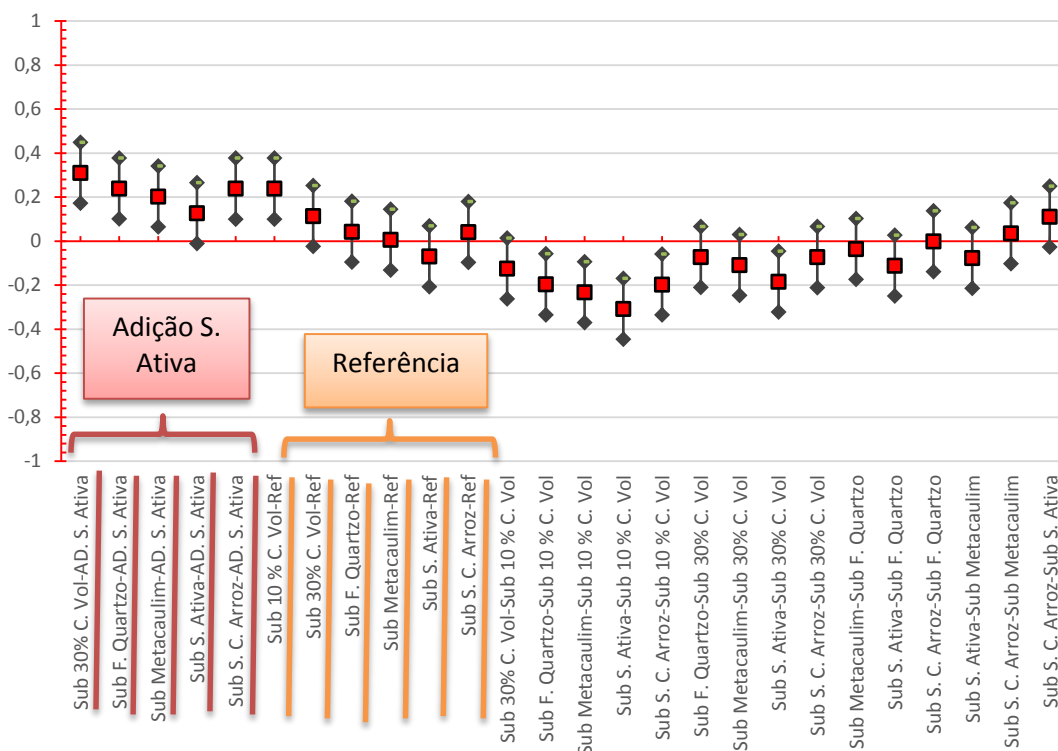


Figura 52 - Teste Tukey da absorção capilar com 72h de ensaio parte 03/03.

A adição de sílica ativa (sublinhada em vermelho) teve a absorção média inferior à dos outros traços estudados, assim como apresentado na Figura 49. E na Figura 50 à Figura 52, é possível visualizar que ela é, estatisticamente, o traço que mais se diferencia dos outros traços. Assim, o traço de adição de sílica ativa foi o único traço que teve uma redução real na absorção comparando com todos os demais traços, segundos os critérios do teste Tukey.

O traço em adição de metacaulim (sublinhado em azul), assim como a sílica ativa teve uma absorção média inferior ao traço de referência. Porém segundo o teste Tukey, a adição de metacaulim tem uma absorção muito próxima dos demais traços estudados. O que leva a concluir que o baixo desempenho constatado pela adição de metacaulim no teste Tukey é devido ao alto desvio padrão nos resultados deste ensaio para esta amostra, o que pode ter sido consequência de uma falha no ensaio da amostra.

4.4 VOLUME DE PASTA E QUANTIDADE TEÓRICA DE PORTLANDITA NOS CONCRETOS

É possível calcular, teoricamente, a reserva alcalina antes da ocorrência das reações pozolânicas. Segundo Hoppe Filho (2008), a quantidade de hidróxido de cálcio disponível em uma pasta de CPV ARI com a/c 0,45 aos 126 dias é de 32,21% em massa. Então, separando a quantidade de cimento de cada traço, é possível correlacionar a quantidade teórica de hidróxido de cálcio disponível para as reações pozolânicas, apresentada na Figura 53. Por exemplo, o consumo de cimento do concreto de referência é de 353,08 kg/m³, o que irá produzir, teoricamente, 113,7 kg de portlandita. Considerando que o traço do concreto de referência é 1,00:2,25:3,00:0,50, o teor de portlandita na argamassa seca deste concreto é de 9,91 %, obtido pelo proporcional de cimento contido na argamassa do concreto, ou seja, 32,21 %/(1,00 + 2,25). Da mesma forma, o teor de portlandita no concreto é de 4,77 %, obtido da seguinte forma: 32,21 %/(1,00 + 2,25 + 3,00 + 0,50).

Na referida figura, estão apresentados o teor de hidróxido de cálcio considerando a argamassa seca dos concretos da pesquisa (em azul no gráfico), a porcentagem de hidróxido de cálcio disponível nos concretos (destacado na cor vermelha) e a massa de hidróxido de cálcio por metro cúbico de concreto (apresentando em cinza) com sua escala no eixo “Y” secundário (no lado direito da Figura 53).

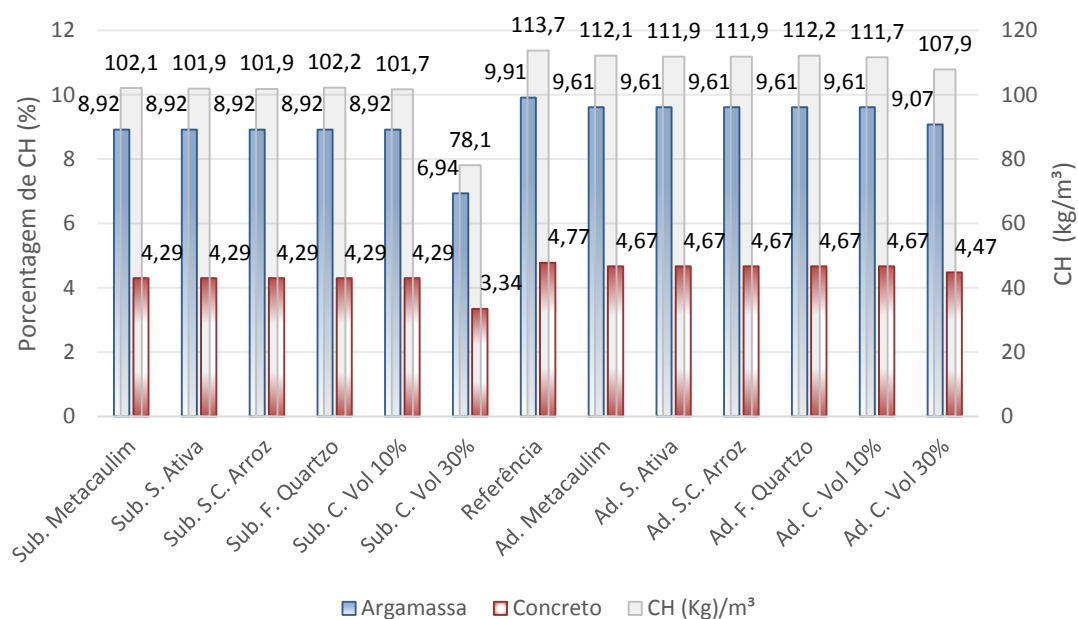


Figura 53 – Massa teórica de portlandita em Kg/m³ de concreto, além das porcentagens teóricas de hidróxido de cálcio na argamassa seca do concreto e no próprio concreto, desconsiderando o consumo de hidróxido de cálcio pela atividade pozolânica.

É possível verificar que as pequenas mudanças na reserva alcalina teórica na argamassa seca do concreto, sem considerar o consumo por atividade pozolânica, são devidas à variação do consumo de cimento. Na Figura 53, é possível visualizar que a reserva alcalina nos concretos é muito menor do que para as argamassas, pois a utilização de brita ocupa o espaço de argamassa, logo haverá menos hidróxido de cálcio por metro cúbico de material.

Assim é possível calcular a reserva alcalina teórica de cada traço estudado e, então, a partir do consumo efetivo de cimento e do potencial de consumo de hidróxido de cálcio de cada adição mineral, estabelecido pelo método Chapelle (Tabela 7), é possível calcular o consumo teórico da reserva alcalina causado por cada adição. Na Figura 54 são apresentados os consumos teóricos de CH por atividade pozolânica em cada traço estudado e os respectivos teores remanescentes (reserva alcalina) na idade de 126 dias.

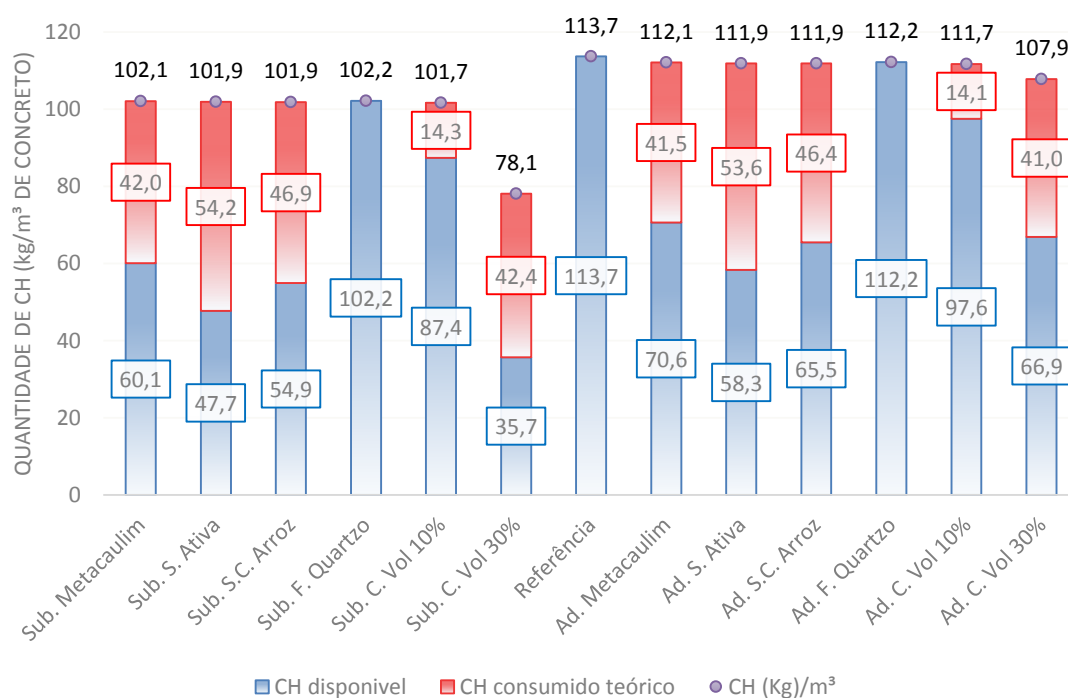


Figura 54 - Cálculo de consumo de hidróxido de cálcio teórico, em volume absoluto, com base na capacidade de fixar cal das adições minerais, determinada pelo ensaio Chapelle modificado (NBR 15.895/2010), e o teor remanescente na matriz hidratada de cada concreto.

Para facilitar a interpretação dos dados sobre a reserva alcalina, todos os dados apresentados na Figura 54 são apresentados na Figura 55 em função da reserva alcalina do traço de referência.

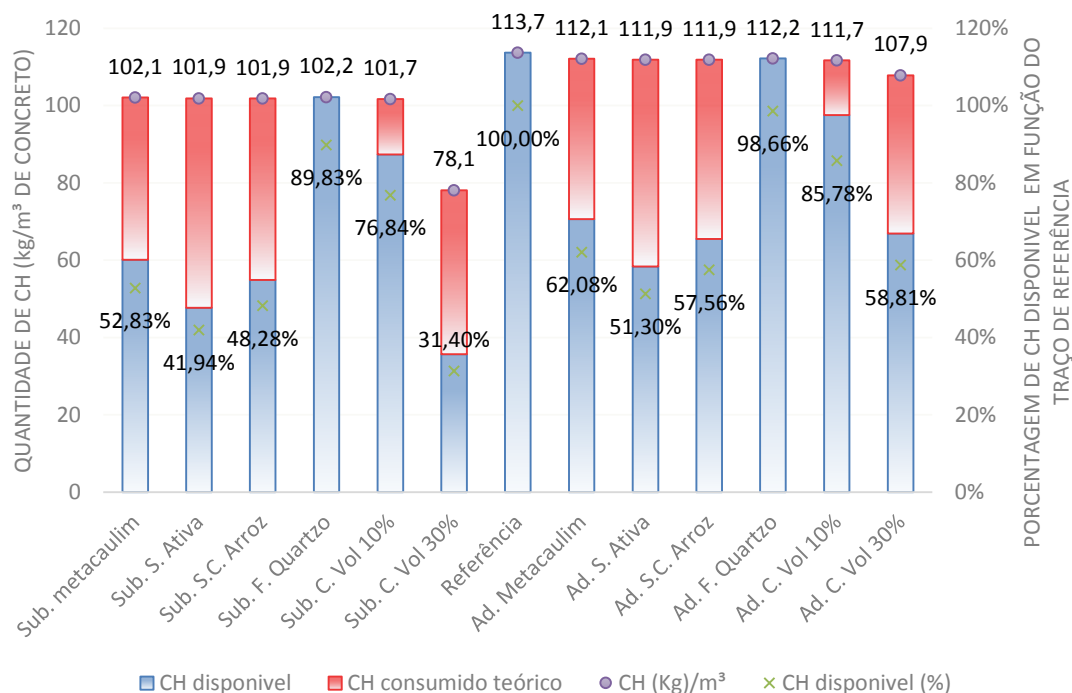


Figura 55 – Cálculo de consumo de hidróxido de cálcio teórico, com base na capacidade determinada pelo ensaio Chapelle modificado (NBR 15.895/2010).

A reserva alcalina teórica terá variações com a inclusão de qualquer material na mistura, assim como a utilização de fíler de quartzo que é um material inerte a temperatura ambiente conforme Moraes (2001). Também haverá alterações nas reservas alcalinas devido as variações de volume e composição do aglomerante causadas pelas características físicas de adição. Desta maneira, a inclusão de qualquer material ao concreto em substituição parcial ao cimento reduzirá a quantidade de hidróxido de cálcio disponível. Por outro lado, a adição de fíler ou pozolana, apesar de reduzir a reserva alcalina, mantém o teor remanescente superior ao observado quando da substituição.

4.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

Na Figura 56 estão apresentados as regiões dos difratogramas de raios-X referentes ao pico principal da portlandita (máxima intensidade). O pico de máxima intensidade da portlandita está localizado em $34,2^\circ 2\theta$. Estes picos estão relacionados à reserva alcalina dos concretos, salientando que, para o ensaio de DRX, foi retirada e preparada a argamassa dos concretos, eliminando-se, assim, a influência do agregado gráudo. Os traços em substituição estão representados por uma linha preta contínua e os

traços de adição ao cimento, em azul pontilhado para as variações de 10%. Para a cinza volante a linha vermelha contínua representa a substituição de 30% e a linha verde pontilhada refere-se à adição de 30% de cinza volante.

Com os resultados encontrados na DRX dos concretos avaliados é possível dividir os concretos em dois grupos de comportamento, o primeiro para as adições da alta reatividade e o segundo para as de baixa reatividade ou inerte. No primeiro grupo, de alta reatividade, a sílica ativa e o metacaulim tiveram comportamentos muito semelhantes, demonstrando que a reserva alcalina visualizada no ensaio de DRX é menor para os traços de adição do que para os traços de substituição, contrariando a ideia de que a maior quantidade de hidróxido de cálcio utilizado em sua dosagem teria uma maior reserva alcalina aos 126 dias de idade quando comparado com as respectivas dosagens em substituição. Neste caso, como o consumo das adições minerais por metro cúbico de concreto é praticamente o mesmo quando da substituição ou da adição, o consumo de cal teórico, com base no resultado do ensaio Chapelle, também é praticamente o mesmo, conforme apresentado na Figura 54.

Na prática, o consumo varia com a maturação do concreto, variando conforme a disponibilidade de cal e, sobretudo, com a evolução da microestrutura da matriz hidratada. Desta forma, quando da substituição parcial do cimento Portland, a relação cal/pozolana é menor em comparação aos concretos onde houve adição de mesma pozolana. A maior relação cal/pozolana potencializa a atividade pozolânica, o que resulta em maior consumo de cal em uma determinada idade. Portanto, o ensaio de DRX, diferentemente do consumo teórico estabelecido com os resultados do ensaio Chapelle, evidencia que nos concretos com a adição de metacaulim ou sílica ativa o consumo de cal foi superior ao observado nos mesmos concretos, porém com a substituição parcial do cimento pelas respectivas adições anteriormente citadas.

Para o segundo grupo, a reserva alcalina encontrada foi maior para as adições do que para as substituições, apesar da maior relação cal/adção também potencializar a atividade pozolânica. Este comportamento está relacionado à baixa reatividade das adições ou ao caráter inerte do fíler quartzoso. A sílica de casca de arroz apresentou uma reserva alcalina similar tanto para a adição quanto para a substituição, situação que não era esperada devido ao seu alto potencial pozolânico. A similaridade do teor de cal obtido na matriz hidratada indica que, apesar da alta capacidade de consumo de cal, a velocidade com que ocorre este consumo é inferior ao observado na sílica ativa ou no metacaulim,

ou seja, apesar da maior disponibilidade alcalina quando da adição, a taxa de consumo de cal foi similar tanto na adição quanto na substituição ao cimento.

Na Figura 56 deve-se notar que, em praticamente todos os casos, o emprego das adições minerais reduziram a reserva alcalina do concreto devido a redução da intensidade do pico principal de portlandita, se comparado com a série de referência. A única exceção foi o caso do uso de fíler quartzoso empregado como adição ao cimento Portland que apresentou aumento da intensidade do pico principal de portlandita. Este resultado é justificado pelo efeito físico das finas partículas de quartzo sobre a cinética de hidratação do cimento, o que acelera a hidratação das fases anidras e, consequentemente, aumenta o teor de portlandita produzido. Também há que se considerar a variabilidade das amostras, não somente para o caso do fíler, mas também para as demais adições minerais, pois o material ensaiado decorre da moagem da argamassa extraída dos corpos de prova de concreto. Como este é um ensaio passível de variação em função da heterogeneidade do concreto, a amostra coletada para o ensaio pode ter sofrido alguma interferência aleatória, o que interfere na intensidade dos picos dos difratogramas.

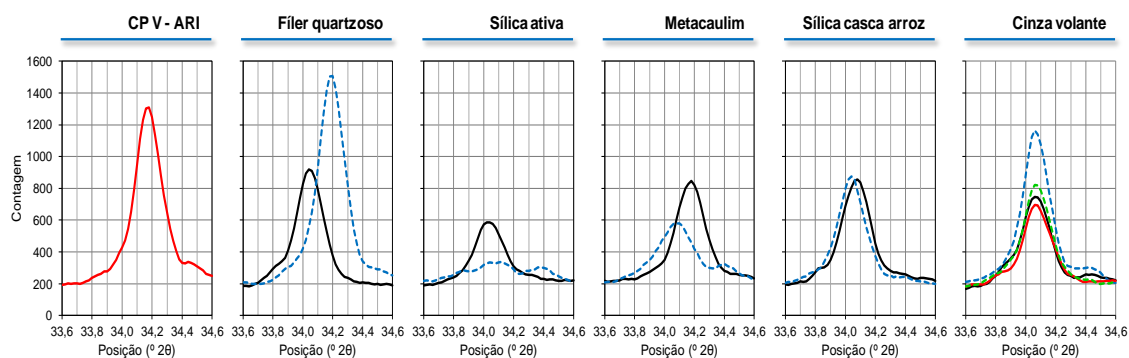


Figura 56 – Difratogramas de todas as amostras (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

A Figura 57 apresenta o difratograma da série de referência em comparação com as séries com substituição e adição de metacaulim. Nesta imagem verifica-se que o traço de adição de metacaulim apresentou reserva alcalina menor do que o traço de substituição. Para o metacaulim a situação esperada era que o traço dosado em adição ao cimento tivesse uma maior reserva alcalina considerando que o cimento não seria subtraído na dosagem, deixando uma reserva alcalina maior do que o traço de substituição. Mas, conforme Quarcioni (2015), a maior disponibilidade de material reagente (hidróxido de cálcio e pozolanas) facilita o acontecimento das reações químicas. Logo, com o alto potencial pozolânico do metacaulim o maior consumo de hidróxido de cálcio pode ter sido facilitado pelas grandes concentrações dos reagentes.

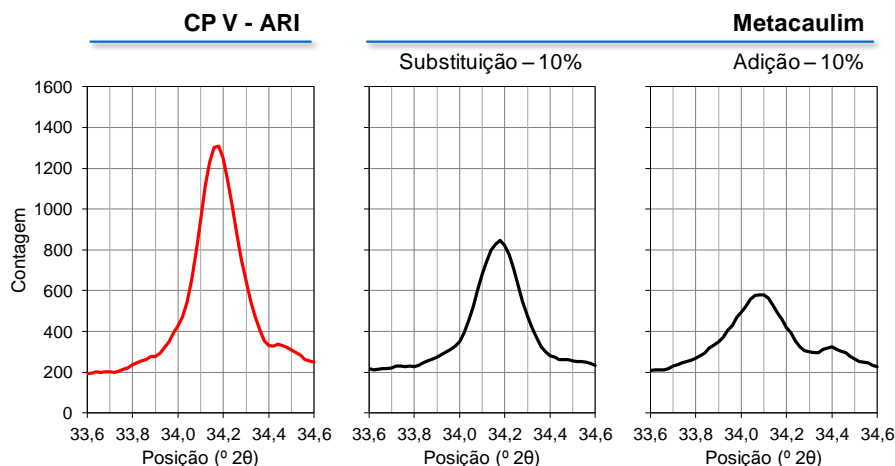


Figura 57 – Difratomogramas das amostras de Metacaulim (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

Nos ensaios de DRX dos traços de sílica ativa, apresentados na Figura 58, demonstra-se que o traço em adição ao cimento consumiu mais hidróxido de cálcio que a substituição. Assim como no metacaulim, o traço de adição de sílica ativa ao cimento teve menor reserva alcalina se comparado com a substituição e a série de referência.

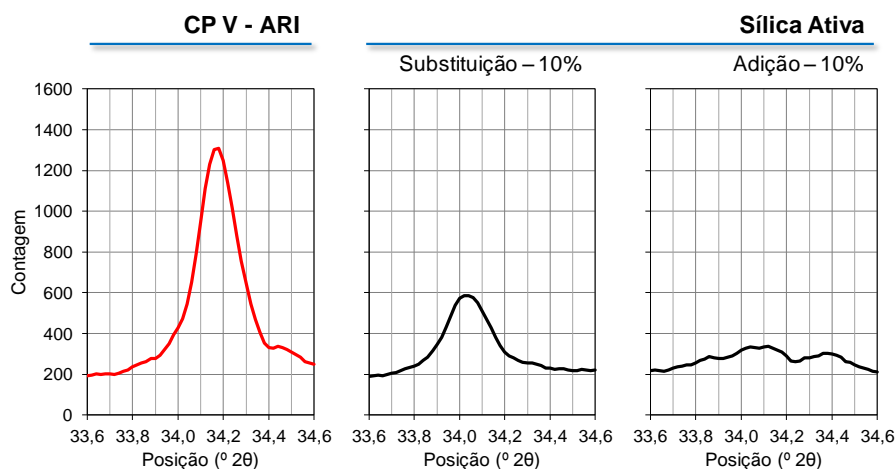


Figura 58 – Difratomogramas das amostras de sílica ativa (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

Os resultados da DRX das dosagens feitas com sílica de casca de arroz, apresentadas na Figura 59, demonstraram que parte do hidróxido de cálcio foi consumido em relação à série de referência, mas em intensidades semelhantes para os traços de substituição e adição.

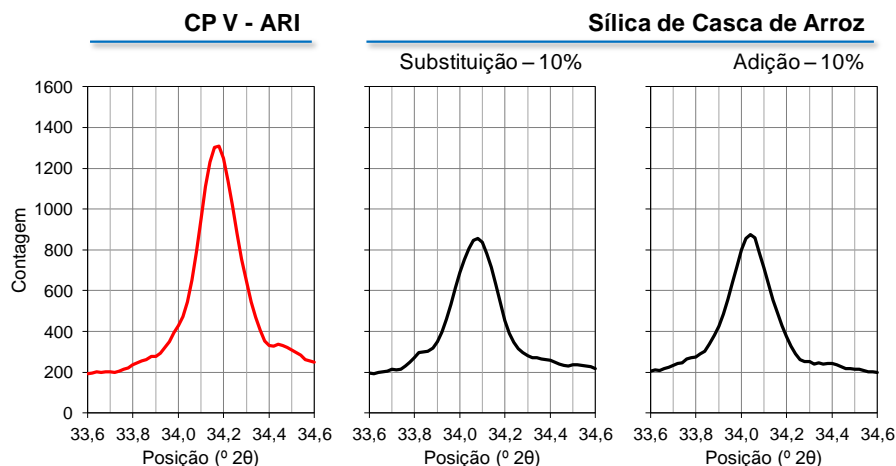


Figura 59 – Difratomogramas das amostras de sílica de casca de arroz (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

No ensaio de DRX com 10% de cinza volante, apresentado na Figura 60, verifica-se que a reserva alcalina é maior para o traço com adição, no entanto a carbonatação foi mais intensa neste mesmo traço com adição, o que evidencia que a reserva alcalina não é o único fator determinante da velocidade de carbonatação, neste caso o maior consumo de água no traço unitário de adição ao cimento pode ter contribuído para um aumento na quantidade de poros interligados, por consequência facilitando o processo de carbonatação, resultados que condizem com os dados de sorvidade dos referidos concretos.

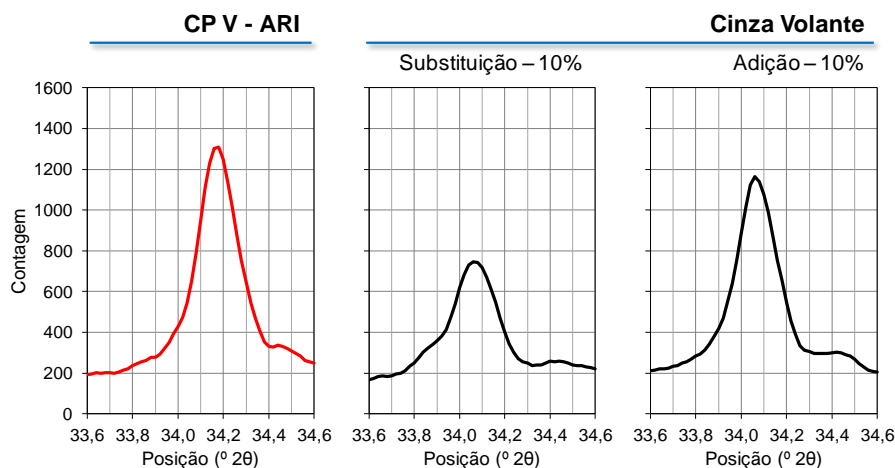


Figura 60 – Difratomogramas das amostras de cinza volante com teor de 10% (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

Para os ensaios de DRX, da variação de 30% de cinza volante, apresentados na Figura 61, demonstram que a situação de adição de 30% teve uma reserva alcalina levemente maior do que a série de substituição, fato que contribuiu para uma resistência a carbonatação mais elevada quando comparado com a substituição.

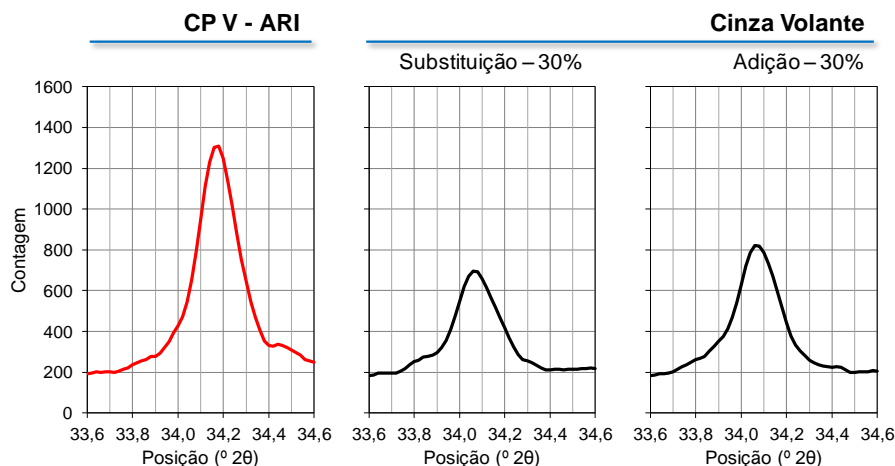


Figura 61 – Difratogramas das amostras de cinza volante com teor de 30% (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

No ensaio de DRX das amostras de fíler de quartzo, o traço com adição apresentou uma reserva alcalina maior do que a substituição, no entanto essa diferença de reserva alcalina não acarretou em ganhos na resistência a carbonatação.

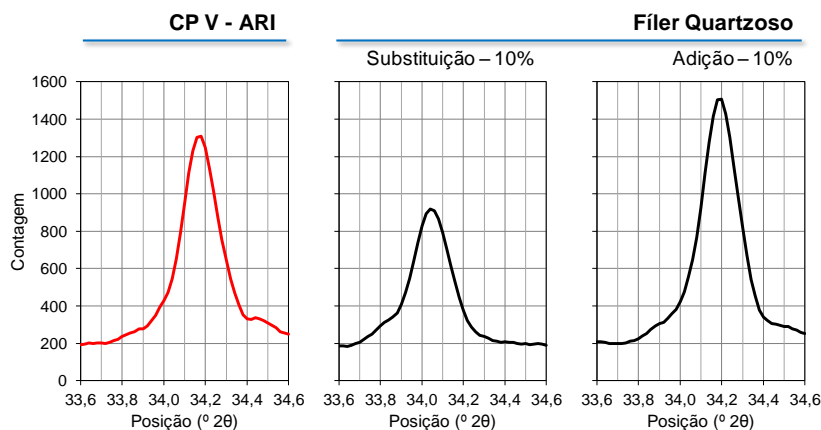


Figura 62 – Difratogramas das amostras de fíler quartzoso (pico principal da portlandita localizado na região de 34,2° 2θ).

4.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

As leituras de resistividade foram feitas em duas condições distintas: 1 - corpos de provas em cura saturada (leituras aos 7 e 28 dias); 2 - corpos de prova acondicionados em ambiente com 60% de umidade relativa, 40 °C de temperatura e 5% de CO₂ (leituras após o sazonalamento (previamente à carbonatação acelerada), a 1, 4, 8 e 12 semanas de carbonatação). No entanto, algumas leituras de 12 semanas tiveram que ser descartadas por problemas no aparelho.

Considerando as recomendações da norma espanhola UNE 83988-2 (2014), foi utilizado um fator de forma de 0,377 para corpos de prova de 10 x 20 cm, afim de simular um meio infinito corrigindo as altas leituras para pequenos corpos de prova.

A fim de se realizar uma comparação entre a resistividade de todos os concretos estudados, a idade de 8 semanas foi escolhida, pois foi a idade cujas leituras foram efetivadas para todos os casos. A variação da resistividade de cada concreto com o tempo será apresentada *a posteriori*, de forma a permitir a análise com base na evolução da hidratação do cimento e da atividade pozzolânica, além do efeito da carbonatação do concreto.

Como pode ser visto na Figura 63, a resistividade elétrica do traço com adição de sílica ativa foi muito mais alta que a dos demais traços. Este fato pode ser explicado pelo alto consumo de hidróxido de cálcio, conforme apresentado no ensaio de DRX do material. Para o traço em questão, o pico do difratograma que identifica a portlandita no ensaio de DRX foi muito inferior aos demais traços, indicando alto consumo de portlandita. Conforme citado por Netto (2006), as reações pozzolânicas transformam hidróxido de cálcio em cristais de C-S-H, composto que tem menor capacidade de dissolução em água. Logo, com menos hidróxido de cálcio a solução aquosa dentro do concreto terá menos íons hidroxila (OH^-) reduzindo a concentração iônica, consequentemente aumentando a resistividade elétrica do concreto, conforme apresentado por Hoppe (2005). Além deste efeito, o refinamento dos poros característico dos materiais pozzolânicos citado por Sperb (2003) e Hoppe Filho (2008) também deve contribuir para a elevação da resistividade elétrica da série com adição e com substituição de sílica ativa.

Em todos os concretos estudados a resistividade elétrica aumentou na média, o que pode dificultar o processo corrosivo das armaduras, quando vier a se instalar em um caso real de aplicação destes concretos em uma estrutura de concreto armado (ANDRADE *et al.*, 1996; MEDEIROS, 2001).

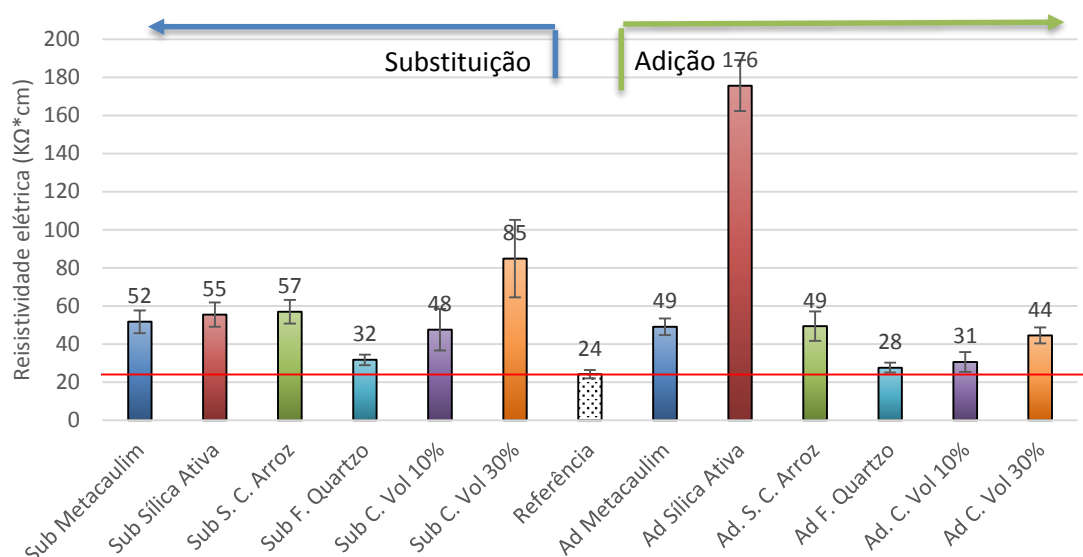


Figura 63 – Resistividade elétrica com 8 semanas de carbonatação.

Quando comparadas estatisticamente as resistividades elétricas pelo teste tukey, apresentado nas Figura 64 à Figura 66, as séries de estudo foram divididas em dois grupos, formados por concretos com média de resistividade elétrica equivalentes. O primeiro é composto pelos sete traços de concreto descritos a seguir (sublinhados em azul nas Figura 64 à Figura 66):

- Substituição de metacaulim;
- Substituição de sílica ativa;
- Substituição de sílica de casca de arroz;
- Substituição de cinza volante 10%;
- Adição de metacaulim;
- Adição sílica de casca de arroz;
- Adição de cinza volante 30%.

O segundo grupo é composto pelos quatro traços de concreto (sublinhados em vermelho nas Figura 64 à Figura 66):

- Adição de fíler de Quartzo
- Adição de cinza volante 10%;
- Substituição de Fíler de Quartzo e;
- Referência.

No entanto, dois traços foram estatisticamente diferenciados entre si e dos demais traços que compõem o estudo e, não puderam ser enquadrados nos grupos citados anteriormente, são:

- Substituição de 30% de cinza volante e;
- Adição de 10% de sílica ativa.

O segundo grupo apresenta média em um patamar inferior de resistividade elétrica superficial se comparado ao primeiro grupo. Os outros dois concretos não inseridos nestes grupos são (sublinhados em laranja): 1 – série com substituição parcial de cimento por cinza volante em teor de 30% em massa, que apresentou resistividade elétrica maior do que os dois grupos; 2 – série com adição de sílica ativa em teor de 10%, que apresentou resistividade elétrica superficial muito superior a todos os casos, sendo 733% maior do que a série de referência.

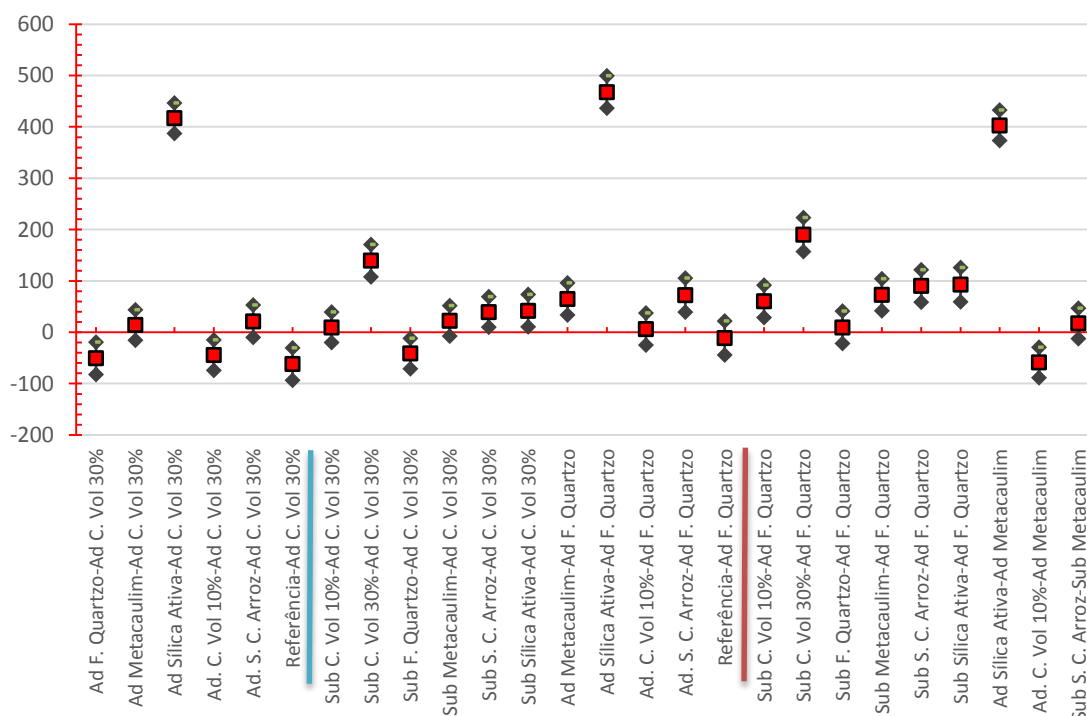


Figura 64 – Teste Tukey da resistividade elétrica com 8 semanas de carbonatação parte 1/3.

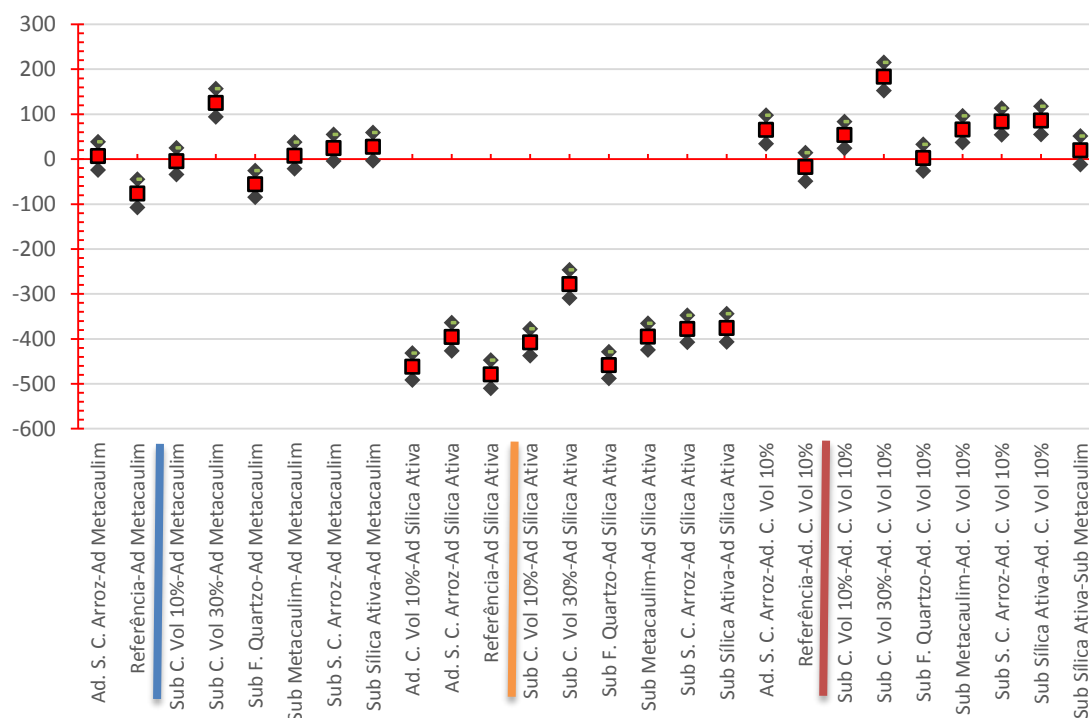


Figura 65 – Teste Tukey da resistividade elétrica com 8 semanas de carbonatação parte 2/3.

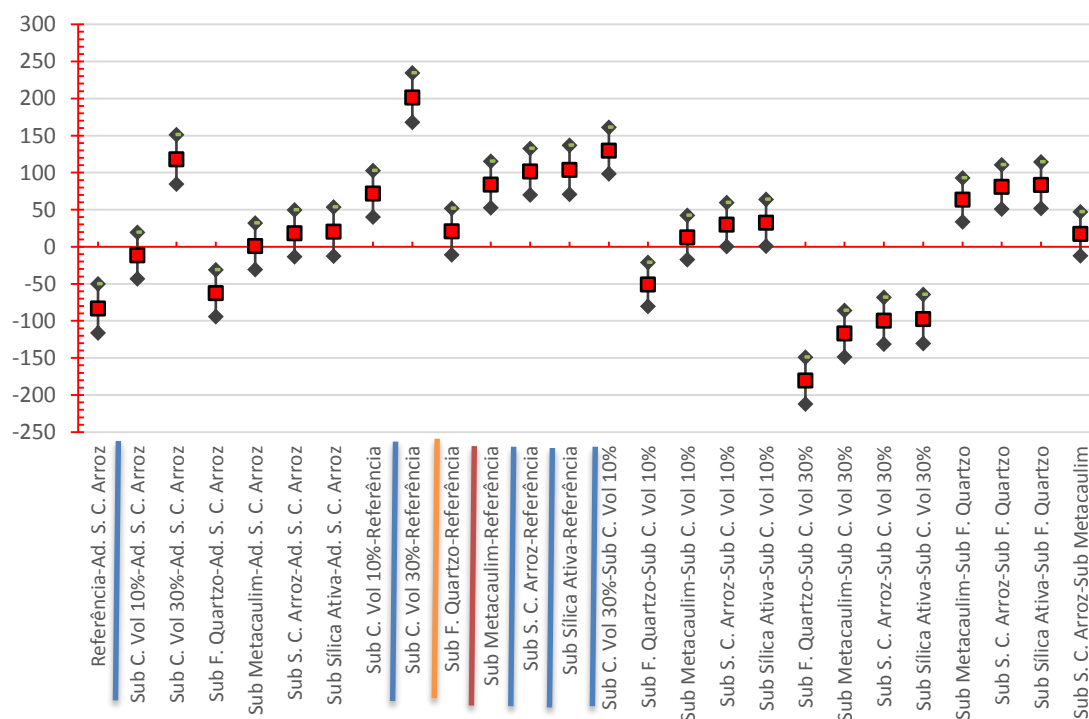


Figura 66 – Teste Tukey da resistividade elétrica com 8 semanas de carbonatação parte 3/3.

4.6.1 Metacaulim

A Figura 67 mostra os dados do monitoramento da resistividade elétrica dos concretos com metacaulim comparados à série de referência ao longo do tempo.

Avaliando o quesito de durabilidade do concreto armado, a resistividade elétrica aumentou para o uso do metacaulim como adição ou substituição parcial do cimento Portland, o que implica em redução da taxa de corrosão de armaduras.

Em todos os concretos estudados é possível diferenciar dois patamares bem distintos de resistividade elétrica devido as diferenças na umidade interna do concreto no momento da realização da leitura. O primeiro é quando o concreto estava saturado, devido ao processo de cura submersa realizado até os 28 dias de idade. Esta situação reduz a resistividade elétrica do concreto, pois o excesso de água ajudar a conduzir a corrente elétrica reduzindo a resistividade. O segundo patamar é após o sazonalamento em que a umidade interna do concreto está em 60% e, com a redução da quantidade de água há um aumento da resistividade elétrica assim como proposto por Andrade (2004), Hoppe (2005), Santos (2006) e Santor *et al.* (2012).

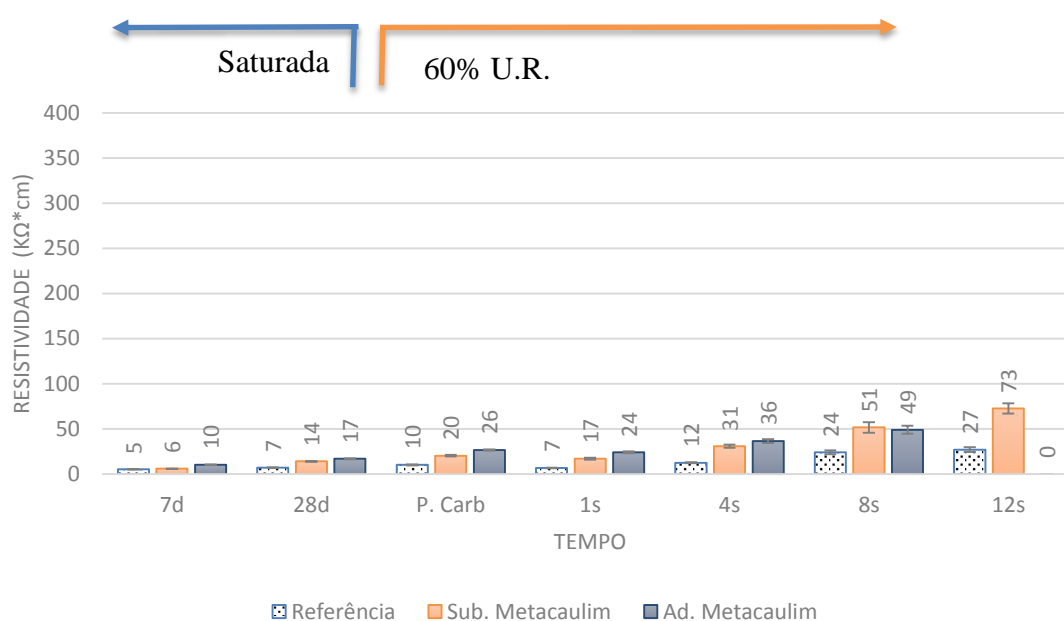


Figura 67 – Resistividade elétrica do concreto com metacaulim.

4.6.2 Sílica ativa

A resistividade elétrica para os concretos com adição e substituição por sílica ativa é mostrada na Figura 68, em que a amostra empregada com a adição de sílica ativa ao cimento foi significativamente maior comparado com a resistividade do concreto com o uso como substituição parcial e com a série de referência. De acordo com Abreu (1998),

quanto menor a absorção capilar do concreto, menor será a porosidade e por consequência a resistividade elétrica será aumentada. Seguindo este raciocínio, os dados são coerentes uma vez que a absorção de água da série com adição de sílica ativa ao cimento em teor de 10% tem redução de 74% em relação à série de referência e de 40% em relação à série com substituição parcial do cimento Portland.

Além da diferença causada pela umidade interna do concreto, resultado da diferença entre a fase saturada e com 60% de umidade interna, há uma grande diferença entre as leituras de resistividade elétrica da adição para a substituição que pode também ser consequência do consumo do hidróxido de cálcio pela atividade pozolânica. Assim como apresentado anteriormente, conforme Hoppe (2005), as reações pozolânicas consomem o hidróxido de cálcio, o que reduz a quantidade de hidroxilas dissolvidas em água no interior do concreto, que por consequência aumenta a resistividade elétrica (NETTO, 2006).

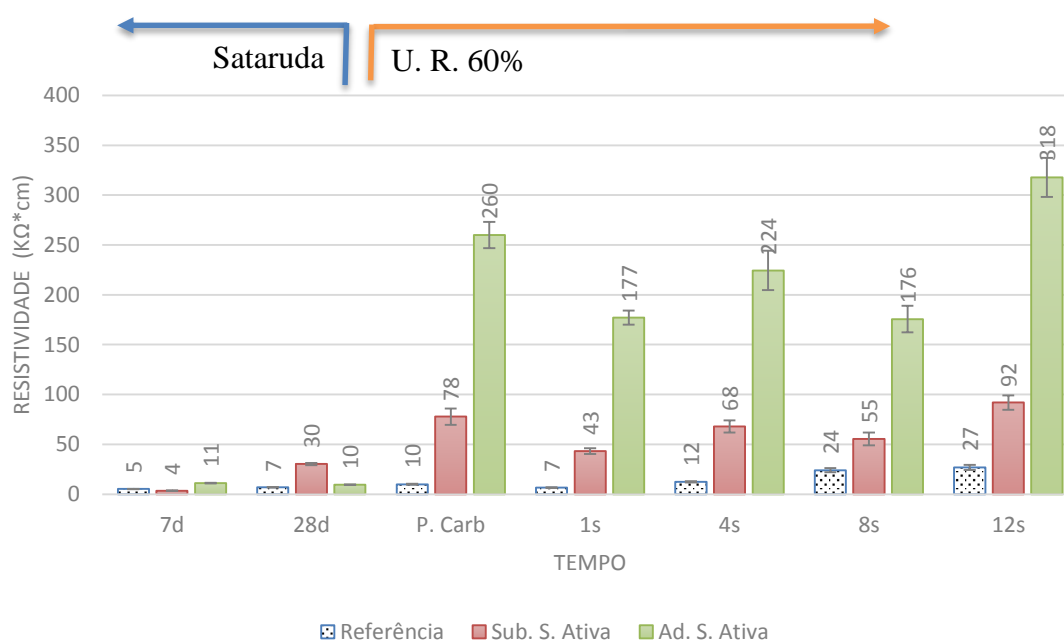


Figura 68 - Resistividade elétrica do concreto com sílica ativa.

Embora a carbonatação do concreto tenha sido facilitada pela redução do hidróxido de cálcio, no traço de substituição, a resistividade elétrica encontrada nesses traços foi muito mais elevada que o traço de referência. Desse modo, ainda que a utilização desta adição mineral possa ser prejudicial para a carbonatação, pode ser favorável a redução da cinética da corrosão de armaduras pela sua maior resistividade, conforme citam Andrade *et al.* (1996) e Medeiros (2001). Ou seja, existe aceleração do processo de carbonatação,

mas redução da velocidade de corrosão subsequente. E para o caso da utilização em adição ao cimento o efeito é cumulativo, maior dificuldade de carbonatação e menor velocidade de corrosão durante o período de propagação da corrosão.

4.6.3 Sílica de casca de Arroz

Como mostrado na Figura 69, assim como no caso da sílica ativa, o emprego da sílica de casca de arroz aumentou a resistividade elétrica de 26,9 K Ω .cm a 12 semanas (série de referência) para 94,1 K Ω .cm (aumento de 250%) e 103 K Ω .cm (aumento de 283%) para substituição e adição, respectivamente.

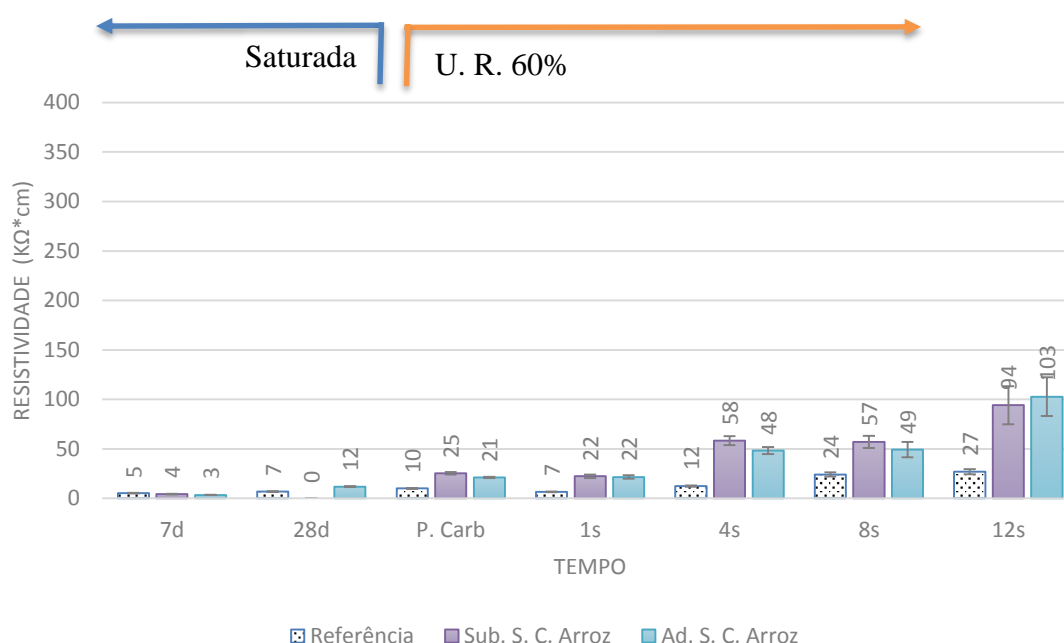


Figura 69 - Resistividade elétrica para o concreto com sílica de casca de arroz.

4.6.4 Cinza volante

Os resultados da resistividade elétrica dos concretos com cinza volante da Figura 70 foram condizentes com ensaios de absorção capilar, havendo uma relação inversa entre os ensaios. Nos concretos com alta resistividade elétrica, a absorção capilar foi menor, demonstrando que concretos mais resistivos geralmente são mais densos, conforme defendeu Abreu (1998).

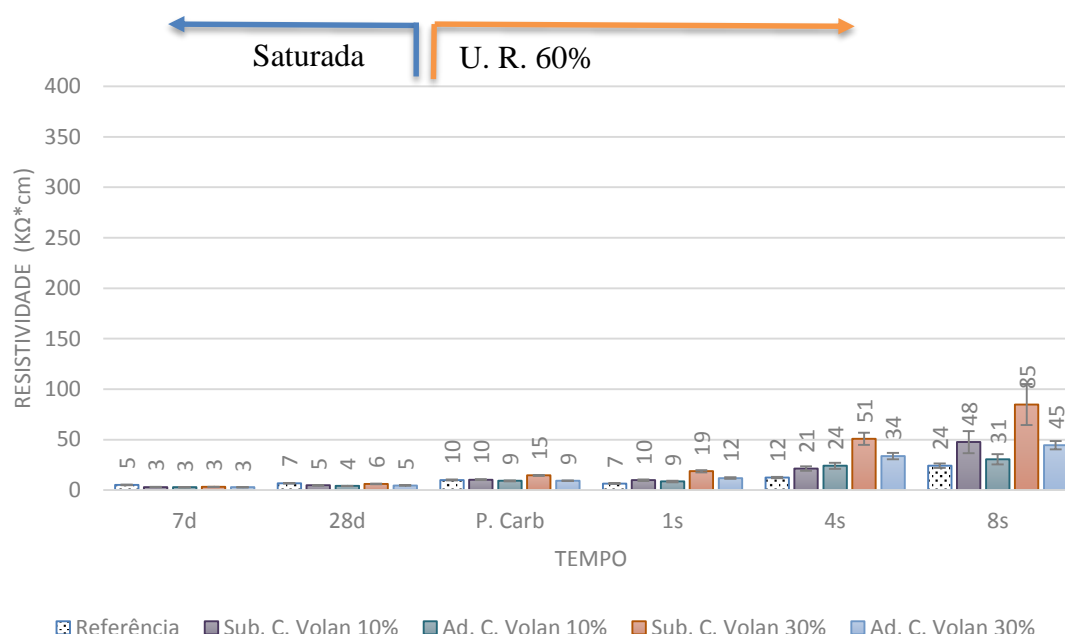


Figura 70 - Resistividade elétrica do concreto com cinza volante.

Conforme o teste Tukey, os traços de referência e adição de 10% de cinza volante são estaticamente iguais, o que segundo Abreu (1998), os coloca como uma porosidade muito semelhante. Este fato pode ter ocorrido pelo acréscimo da relação água/cimento no traço de adição de 10% de cinza volante. No traço referência a relação água/cimento foi de exatamente 0,5 e para a adição de 10% de cinza volante a relação água/cimento efetiva foi de 0,55. Assim, embora a microestrutura tenha melhorado pela atividade pozolânica, a microestrutura também foi um pouco piorada pelo acréscimo de água, o que colocou esses dois traços em uma condição de igualdade perante à resistividade.

Segundo Abreu (1998) e Medeiros Júnior et al. (2014), a maior resistividade elétrica dos concretos pode ser causada pela menor relação água/cimento. Desse modo, nos concretos desta pesquisa realizados com substituição, a maior resistividade elétrica pode estar vinculada a menor relação água/cimento utilizada para a moldagem do traço o que deixou o concreto menos poroso, pois os traços com adição tinham 10% de volume de água adicionada em relação aos de substituição e 30% para as variações de 30% de cinza volante. Além disso, de acordo com Hoppe (2005) e Netto (2006), a menor disponibilidade de reserva alcalina pode ajudar a incrementar a resistividade elétrica dos concretos. Como houve redução da reserva alcalina nos casos dos concretos com substituição parcial do cimento por cinza volante, isso se refletiu como incremento da resistividade elétrica.

4.6.5 Fíler Quartzoso

A Figura 71 mostra os dados de resistividade elétrica superficial para o caso do uso de fíler quartzoso como adição e como substituição parcial ao cimento Portland. Neste caso, avaliado pelo teste Tukey, as três dosagens foram consideradas iguais indicando que o fíler quartzoso não influenciou a resistividade elétrica superficial. Analisando pelo âmbito da reserva alcalina, este fato é coerente no que se refere ao cálculo da portlandita disponível (calculado teoricamente) que indicou que as séries com fíler quartzoso apresentam a reserva alcalina semelhante comparada ao concreto de referência.

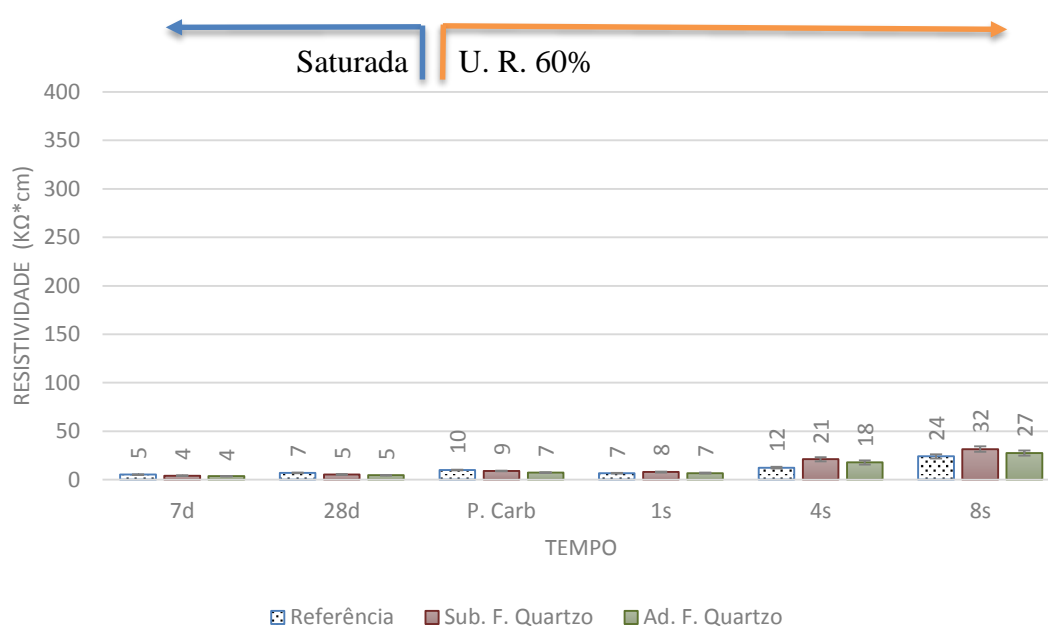


Figura 71 – Resistividade elétrica do concreto com fíler quartzoso.

4.7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.7.1 Velocidade de carbonatação para adições de alta reatividade

Nesta parte estão discutidos os resultados de carbonatação para as pozolanas de alta reatividade ou superpozolanas, consideradas aqui como: metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz. Também faz-se uma avaliação global com informações de outros ensaios realizados e cálculos teóricos de reserva alcalina.

4.7.1.1 Metacaulim

As leituras de profundidade de carbonatação realizadas nas amostras de concreto com metacaulim indicam que o traço realizado com adição acrescida ao cimento dificultou o avanço da frente de carbonatação. No entanto, a utilização deste material em substituição parcial ao cimento, acelerou o processo, com o coeficiente de carbonatação passando de $1,46 \text{ mm/semana}^{0,5}$ (série de referência) para $1,93 \text{ mm/semana}^{0,5}$, como pode ser observado na Figura 72.

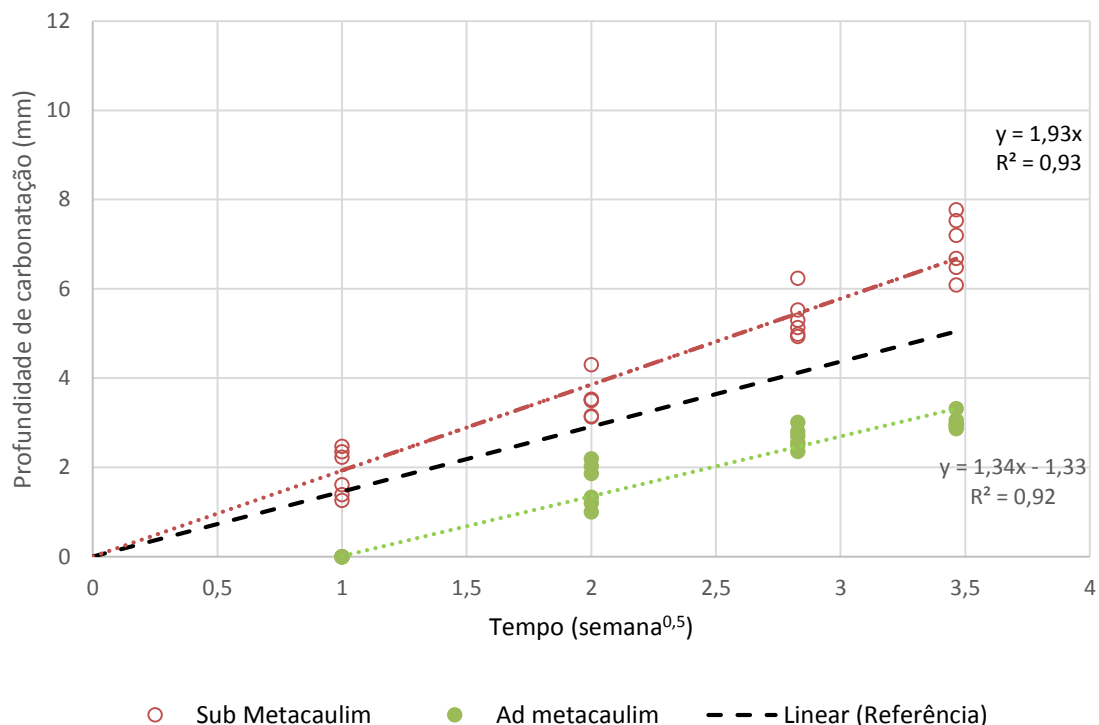


Figura 72 – Profundidade de carbonatação do concreto com metacaulim.

O traço de substituição parcial por metacaulim (10%) teve sua resistência à carbonatação desfavorecida pela troca de parte do cimento por metacaulim. Segundo o cálculo teórico de hidróxido de cálcio disponível realizado no início deste capítulo, a reserva alcalina foi reduzida para 52,83%, quando comparada ao traço de referência, e isso deve ser um fator de influência na elevação da velocidade de carbonatação. Deve-se notar que nesta comparação a resistência à compressão a 28 dias foi de 61,5 MPa (para a série de referência) e 62,8 MPa (para a série com 10 % de substituição parcial do cimento por metacaulim), ou seja, tratam-se de concretos da mesma faixa de resistência. Porém, também é verdade que a sorvidade é menor na série com substituição parcial de cimento, com o valor de 0,0107 g/cm² (série de referência) e de 0,0053 g/cm² (substituição parcial por metacaulim), ou seja, redução de 50 % na sorvidade. Porém, neste caso os resultados indicam que a redução da reserva alcalina foi mais decisiva do que a redução na sorvidade no que se refere a governar a velocidade de carbonatação.

Para o traço com adição de metacaulim, a resistência a carbonatação foi aumentada a ponto que na primeira semana de carbonatação não foram encontradas leituras de profundidade de carbonatação, fazendo com que o coeficiente $K = 1,34$ seja válido apenas para mais de uma semana em carbonatação acelerada. Também é importante destacar que no caso em questão a redução na velocidade de carbonatação foi de apenas 8% (1,46 mm/semana^{0,5} para a série de referência e 1,34 mm/semana^{0,5} para a série com adição de metacaulim). Neste caso, a redução da velocidade de carbonatação ocorreu mesmo com a série com 10 % de metacaulim usado como adição ao cimento Portland tendo apresentado 63 % de redução da reserva alcalina em relação ao traço de referência, indicando que existem outros fatores importantes controladores da carbonatação além da reserva alcalina. Este aumento da resistência à carbonatação pode ser consequência do aumento do volume de pasta apresentado na Figura 29, mostrando que os 10 litros, em média de aglomerantes adicionado ao traço aumentaram o volume de pasta, aumentando a quantidade de hidróxido de cálcio em função do m³ de concreto, e por consequência a dificuldade à carbonatação.

Deve-se destacar que existe uma elevada diferença de resistência à compressão entre os concretos comparados, tendo a série de referência 61,5 MPa e a série com adição de metacaulim 78,5 MPa, ou seja, o metacaulim com 10 % de adição resultou em aumento de 28 % na resistência à compressão. Por outro lado, a sorvidade da série de referência foi de 0,0107 g/cm² e com a adição do metacaulim foi de 0,0046 g/cm², ou seja, a adição de 10 % de metacaulim causou 57 % de redução na absorção de água.

Estes dados são indícios que a resistência e a sorvidade tiveram influência na redução da velocidade de carbonatação e a diminuição da reserva alcalina contou para a elevação da velocidade de carbonatação. Com estes parâmetros influenciando em sentidos opostos, o resultado foi um concreto com 8 % de redução da velocidade de carbonatação.

4.7.1.2 Sílica ativa

Conforme a Figura 73, o avanço da frente de carbonatação foi mais intenso no traço de substituição parcial por sílica ativa em comparação com a série de referência, evidenciando que a substituição parcial do cimento Portland por 10% de sílica ativa reduziu a resistência à carbonatação do concreto estudado. Por outro lado, o traço dosado com 10% de sílica ativa adicionada ao concreto apresentou aumento na resistência à carbonatação.

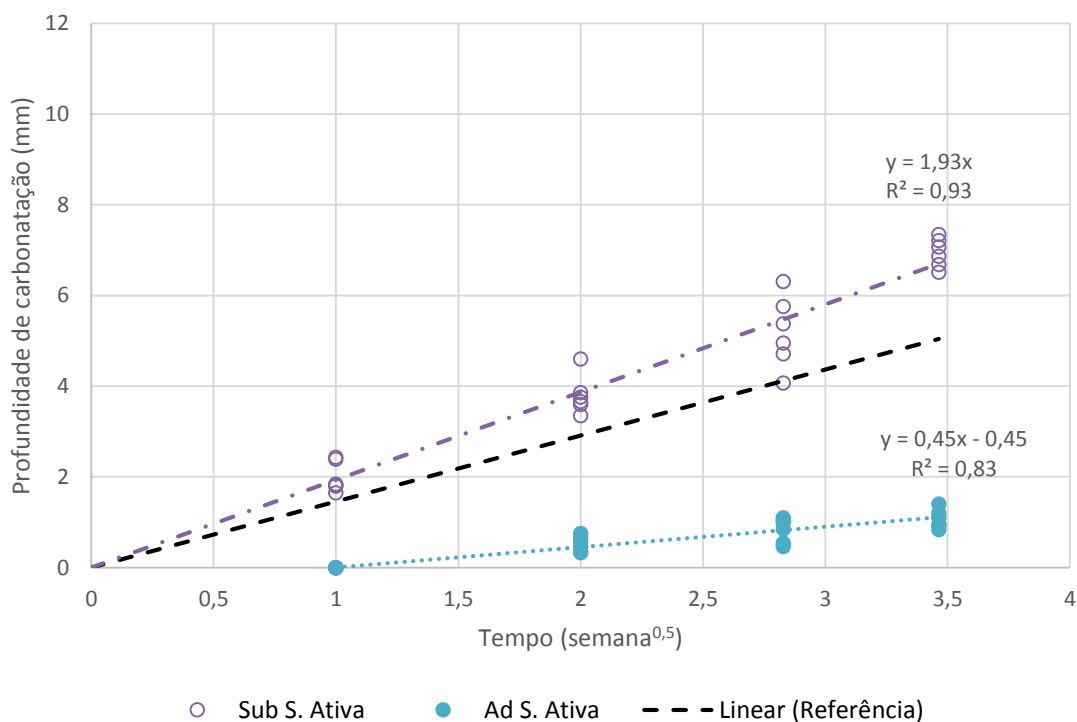


Figura 73 – Profundidade de carbonatação do concreto com sílica ativa.

Para o traço dosado em substituição parcial ao cimento, a redução da reserva alcalina para 41,94% foi determinante, pois embora tenha sido utilizado menos cimento que o traço de referência, como visto na Figura 55, ainda assim a profundidade de

carbonatação foi mais intensa do que a referência. Outro fator de influência que pode ter determinado o aumento da velocidade de carbonatação é a redução da resistência à compressão, uma vez que a série com substituição parcial do cimento por 10 % de sílica ativa apresentou resistência à compressão de 55,7 MPa, enquanto a série de referência apresentou 61,5 MPa, que significa 9 % de redução. Considerando que o desenvolvimento da resistência à compressão é governado pela formação de C-S-H e redução da porosidade do concreto, e que estes fatores também influenciam a velocidade de carbonatação, este parâmetro certamente deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Para o traço dosado em adição ao cimento, as leituras realizadas na primeira semana de carbonatação acelerada foi zero, assim como ocorreu com a adição de metacaulim. Desta maneira, o coeficiente de carbonatação de 0,45 mm/semana^{0,5}, é válido para o intervalo t maior do que uma semana. Como a série de referência apresentou o coeficiente de carbonatação de 1,46 mm/semana^{0,5}, a redução na velocidade de carbonatação causada pelo uso de sílica ativa (em teor de 10 %) foi de 69 %, um valor considerado elevado. Neste caso, apesar do fato desfavorável de a reserva alcalina ter reduzido para 51,3 % em relação à série de referência, a resistência à compressão elevou em 7 % (referência igual a 61,5 MPa e série com adição de sílica ativa igual a 65,6 MPa) e a sorvidade reduziu em 74 % (referência igual a 0,0107 g/cm² e série com adição de sílica ativa igual a 0,0028 g/cm²). Deve-se destacar que a série com adição de sílica ativa foi a que mais causou redução nos valores de sorvidade comparando todos os concretos deste trabalho e isso provavelmente foi mais forte na influência na velocidade de carbonatação do que a redução na reserva alcalina.

4.7.1.3 Sílica de casca de Arroz

Como indicado na Figura 74, a utilização de sílica de casca de arroz tornou os concretos mais suscetíveis à carbonatação do que o concreto de referência. No entanto, segundo o teste Tukey, as profundidades de carbonatação das amostras são iguais no caso do uso deste material como substituição parcial de 10 % do cimento Portland em massa quando comparado com o traço referência. Por outro lado, no caso da série utilizando 10 % de sílica de casca de arroz adicionada ao concreto, deve-se considerar que esta série é estatisticamente diferente ao concreto de referência em termos de velocidade de carbonatação.

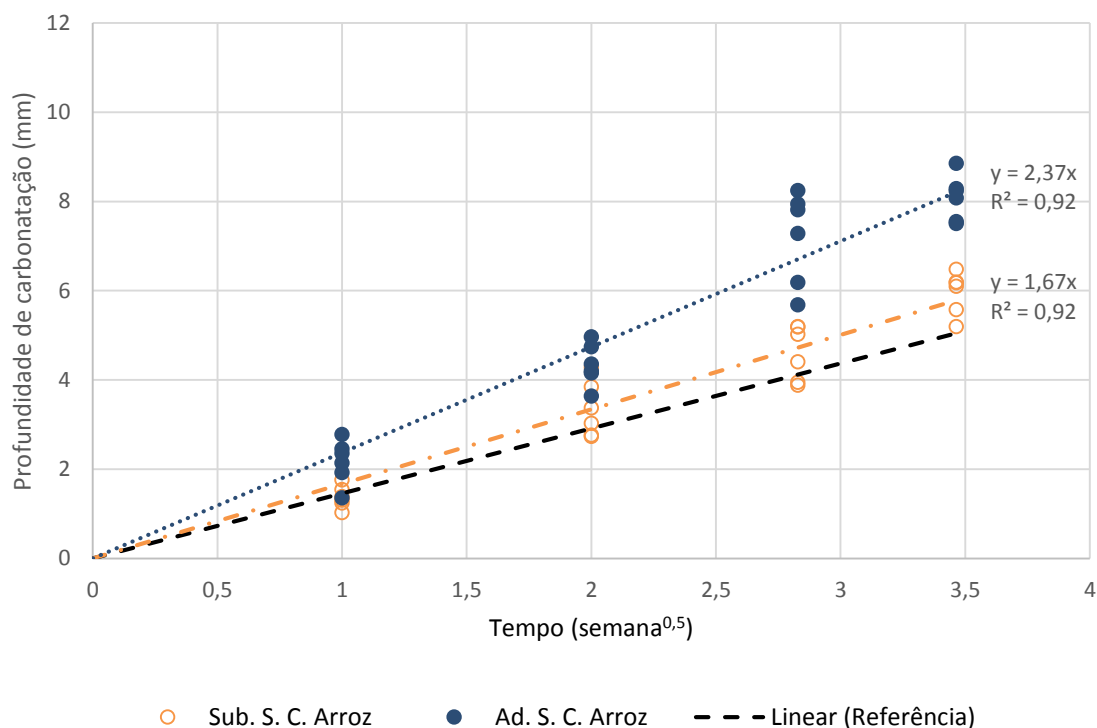


Figura 74 – Profundidade de carbonatação em concreto com sílica de casca de arroz.

A reserva alcalina teórica desta adição seguiu o padrão das demais adições, sendo de 58 % para o traço com adição e de 48 % para o traço com substituição parcial do cimento comparando com a série de referência. Os dados indicam que a reserva alcalina não foi o fator predominante no processo de carbonatação para os concretos estudados e este é mais um indicativo que a reserva alcalina sozinha não explica o processo de carbonatação e sua cinética.

No caso da substituição, em que a diferença do coeficiente de carbonatação é estatisticamente igual à série de referência, pode-se destacar que se tratam de concretos com a mesma resistência à compressão (61,5 MPa para a série de referência e 61,3 MPa para a série com 10 % de substituição do cimento Portland). Além disso, houve a redução de 47 % na sorvidade (referência igual a 0,0107 g/cm² e substituição igual a 0,0057 g/cm²). Neste caso, existe a reserva alcalina contribuindo para acelerar a carbonatação e a redução na sorvidade colaborando para diminuir a velocidade de carbonatação. Parece que neste caso houve um equilíbrio na magnitude da influência destes fatores de modo que o coeficiente de carbonatação ficou equivalente à série de referência.

No caso do emprego da sílica de casca de arroz como adição ao cimento, ocorreu o aumento da velocidade de carbonatação em 62 % (referência igual a 1,46 mm/semana^{0,5} e adição igual a 2,37 mm/semana^{0,5}), redução na sorvidade de 27 % (referência igual a

0,0107 g/cm² e adição igual a 0,0078 g/cm²) e redução na resistência à compressão de 9 % (referência igual a 61,5 MPa e adição igual a 55,9 MPa). Neste caso, o somatório das influências da redução da resistência à compressão e da reserva alcalina, somado ao fato de que a redução da sorvidade foi pequena (só pior do que a cinza volante) resultou em coeficiente de carbonatação mais elevado do que a série de referência.

4.7.2 Velocidade de carbonatação para adições de baixa reatividade

4.7.2.1 Cinza volante

A resistência à carbonatação foi reduzida em todos os casos avaliados com a utilização de cinza volante assim como visto na Figura 75. O concreto que carbonatou com mais facilidade foi com a substituição parcial de 30% de cimento por de cinza volante.

Segundo o teste Tukey, todas as dosagens foram diferentes em relação ao traço de referência, e as dosagens de 10% e 30% são diferentes entre si, mas quando comparadas entre adição ao cimento ou substituição na mesma porcentagem de variação, as médias são consideradas estatisticamente iguais. Desse modo, os resultados indicam que o uso em adição ou em substituição não apresenta diferença significativa, porém, a quantidade de adição mineral apresentou influência estatisticamente importante.

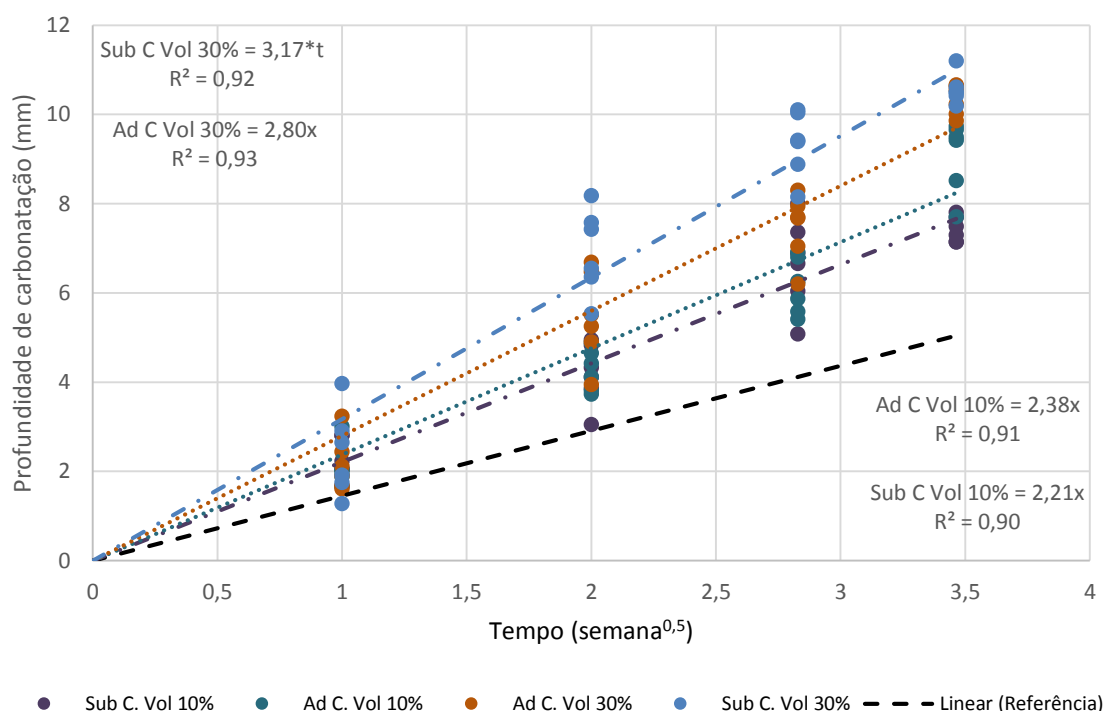


Figura 75 – Carbonatação dos concretos com cinza volante.

Para os concretos executados com a variação de 10% de cinza volante, a substituição e adição tiveram a reserva alcalina teórica em 76,8 % e 85,8 %, respectivamente. Além disso, como comprovado pelo teste de Tukey, a resistência à compressão dos dois casos é estatisticamente igual entre si, ou seja, este é um fator de influência neutralizado neste caso de comparação. Estes fatos colaboraram para o comportamento similar dessas duas amostras.

O fato que pode explicar as semelhanças entre os dois traços com variação de 30% está na quantidade de água utilizada para a execução da adição ao cimento. Como a relação água/aglomerante foi fixada em 0,5 e a quantidade de aglomerante deste traço foi a mais elevada de todo o estudo, resultou em mais água para um metro cúbico de concreto, cerca de 23,3% adicionados em relação ao traço de referência. Calculando a relação água/cimento desconsiderando a quantidade de adição mineral, a substituição teve uma relação real de 0,71 enquanto o traço de adição de 30% ao cimento ficou em 0,65, embora a relação água/aglomerante seja 0,5 para todas as dosagens estudadas. Este efeito resultou em concretos com os menores níveis de resistência à compressão entre todos os concretos deste estudo, 35,9 MPa e 39,6 MPa para as séries com adição e substituição, respectivamente. Como a série de referência apresenta resistência à compressão de 61,5

MPa, é esperado que este tipo de substituição apresente maiores níveis de velocidade de carbonatação.

Como visto na Figura 75, os traços realizados com a variação de 10% em cinza volante tiveram resistência à carbonatação maior quando comparados aos traços dosados em 30%.

4.7.2.2 Fíler Quartzoso

A utilização de fíler quartzoso aumentou a velocidade de carbonatação tanto na adição quanto na substituição parcial do cimento, assim como pode ser visto na Figura 76.

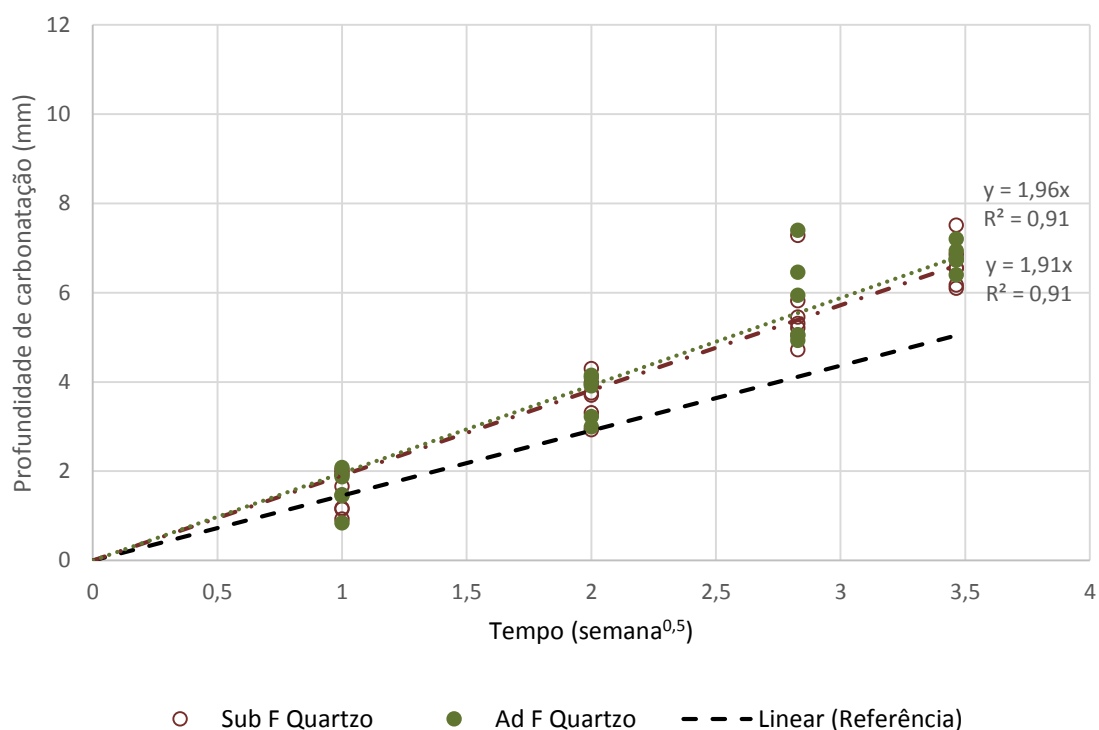


Figura 76 – Profundidade de carbonatação no concreto com fíler quartzoso.

A utilização de fíler de quartzo além de reduzir a resistência à compressão do concreto de 61,5 MPa (concreto de referência) para 49,7 MPa (substituição) e 42,8 MPa (adição), também reduziu as reservas alcalinas teórica em aproximadamente 10,17% para a substituição e 1,34% para adição. No entanto, grande parte dessa redução da reserva alcalina está associada às mudanças no volume da pasta que foram comentadas no início deste capítulo, pois o fíler de quartzo é considerada inerte a temperatura ambiente (MORAES, 2001).

4.7.3 Relação entre os resultados dos ensaios

Esta parte do trabalho tem o foco de tentar entender como os resultados dos ensaios realizados se relacionam, assim como parâmetros calculados, tais como a portlandita disponível e relação água/cimento. No final, fez-se uma tentativa de propor um índice de correlação composto por alguns parâmetros de entrada de modo a poder estimar o efeito da carbonatação em um dado concreto.

4.7.3.1 Efeito da resistência à compressão, sorvidade e resistividade elétrica no K_{CO_2}

Com os dados obtidos neste trabalho tentou-se realizar algumas correlações entre resultados para entender os fatores de influência nos dados de carbonatação do concreto, principal variável de resposta desta pesquisa.

Adotou-se como padrão desta análise fazer os gráficos de correlação geral dos dados e os gráficos relativos à substituição e à adição separadamente. A primeira tentativa foi montar os gráficos de relação de K_{CO_2} com a resistência à compressão, sorvidade e resistividade elétrica superficial.

A Figura 77 apresenta a relação de K_{CO_2} com a resistência à compressão e nota-se que os dados indicam a tendência de o aumento da resistência reduzir o coeficiente de carbonatação, porém os valores de R^2 ficaram entre 0,57 e 0,63. Isso indica que a relação entre estas duas grandezas é fraca e existem outros fatores influenciando o coeficiente de carbonatação. Isso está de acordo com os resultados das pesquisas de Hoppe Filho *et al.* (2013) e Medeiros Júnior *et al.* (2014), que evidenciaram que a resistência à compressão não garante a durabilidade em condições de uso.

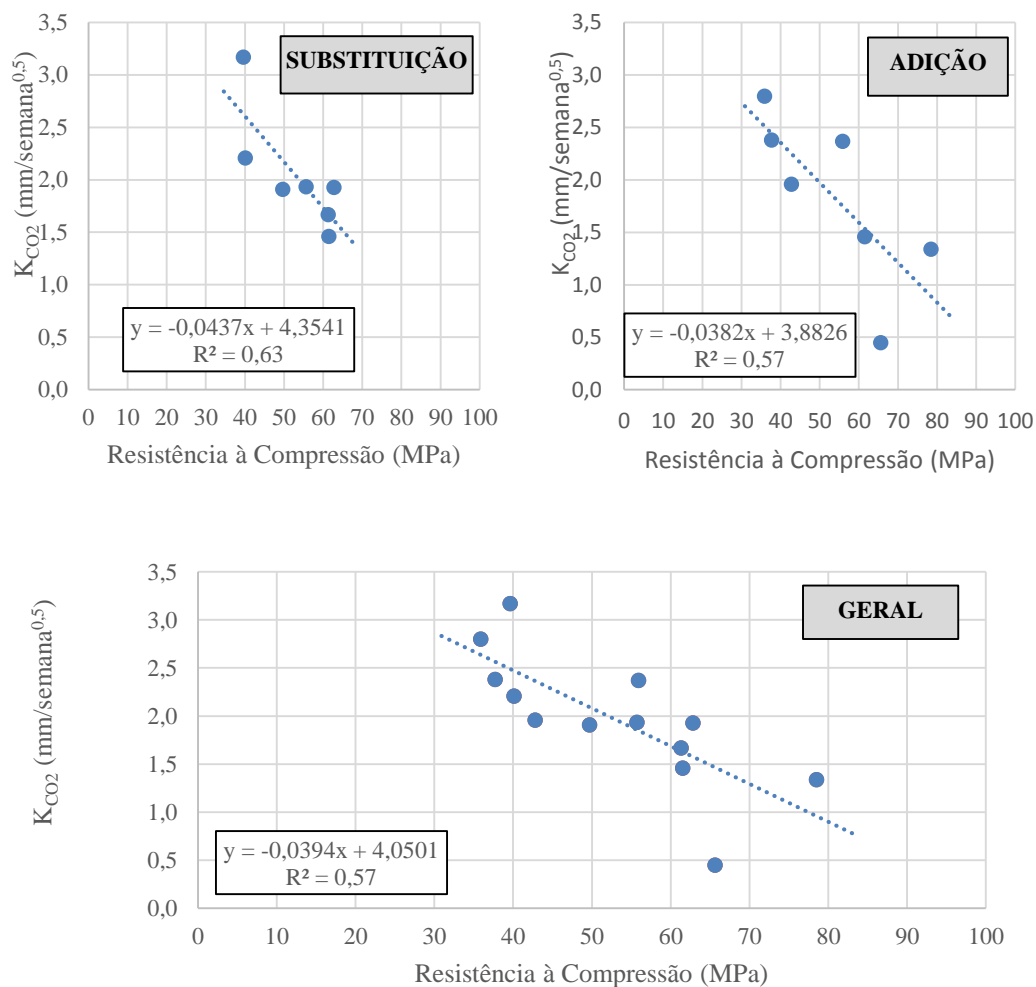


Figura 77 – Relação entre o coeficiente de carbonatação (K_{CO_2}) e a resistência à compressão.

A Figura 78 indica a relação entre o K_{CO_2} e a sorvidade e observa-se uma tendência de relação direta entre as duas grandezas, ou seja, quanto maior a absorção de água, maior o coeficiente de carbonatação. Isso é esperado porque a água que entra por capilaridade ingressa pela rede de poros capilares abertos do concreto e a frente de carbonatação também avança através desta mesma rede de poros. Porém, os valores de R^2 variaram de 0,28 a 0,43 indicando fraca correlação entre as duas grandezas.

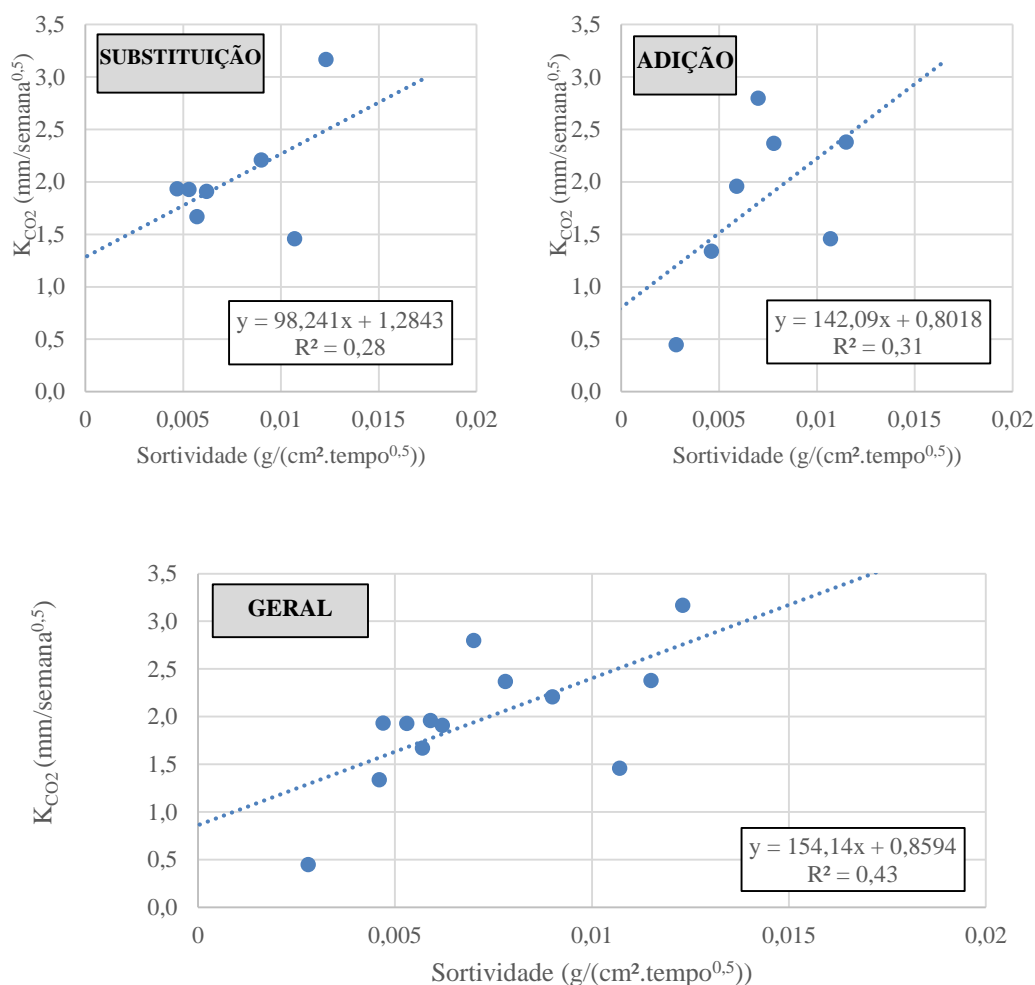


Figura 78 - Relação entre o coeficiente de carbonatação (K_{CO_2}) e a sorvidade.

A Figura 79 apresenta a relação entre o K_{CO_2} e os dados de resistividade elétrica superficial. Neste caso deve ser dado destaque a inconsistência apresentadas nos dados, uma vez que no caso do efeito separado da substituição a indicação foi de relação direta entre os dados, porém, no caso do efeito separado da adição a relação indicada foi inversa, ou seja, a maior resistividade levando a um menor coeficiente de carbonatação. Observando a distribuição dos dados nos gráficos da Figura 79, para o caso de comparação geral, nota-se que os pontos são concentrados e dispersos na faixa de 50 a 200 k Ω .cm e o ponto mais na direita do eixo x se comportando como um dado espúrio. Desta forma, de modo geral neste trabalho de pesquisa a resistividade elétrica superficial não parece ser um bom parâmetro para ser relacionado com o processo de carbonatação.

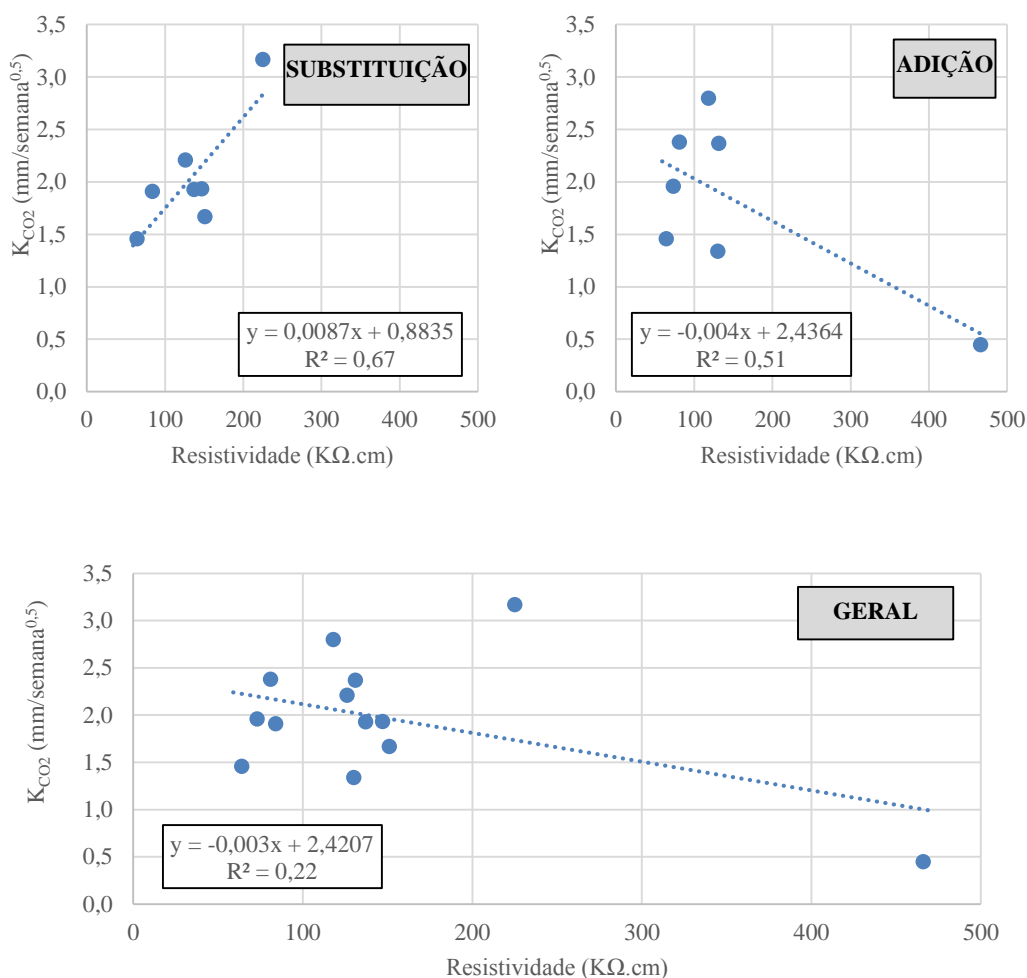


Figura 79 - Relação entre o coeficiente de carbonatação (K_{CO_2}) e a resistividade elétrica superficial.

A Figura 80 e 81 mostram, respectivamente, a relação do K_{CO_2} com a cal disponível (calculada teoricamente) e com a intensidade do pico de DRX equivalente a portlandita, ambos indicativos de magnitude da reserva alcalina. Nos dois casos ficou claro que a reserva alcalina não é capaz de explicar completamente a carbonatação. Porém, Barin (2008) defendeu que a reserva alcalina é um importante fator a ser avaliado para estudar a carbonatação no concreto. Pessoa e Nepomuceno (2002) também defendem que quanto maior for o consumo de cimento, maior será a resistência à carbonatação. Estes autores explicam este fato argumentando que o acréscimo na quantidade de cimento gera uma maior reserva alcalina por unidade de volume e, desta forma, há necessidade de mais tempo para que a frente de carbonatação progrida em profundidade no concreto.

Desse modo, embora os dados deste trabalho não tenham apresentado uma relação bem definida com os dados de carbonatação, este é um parâmetro que não deve ser desprezado nos estudos em geral sobre carbonatação.

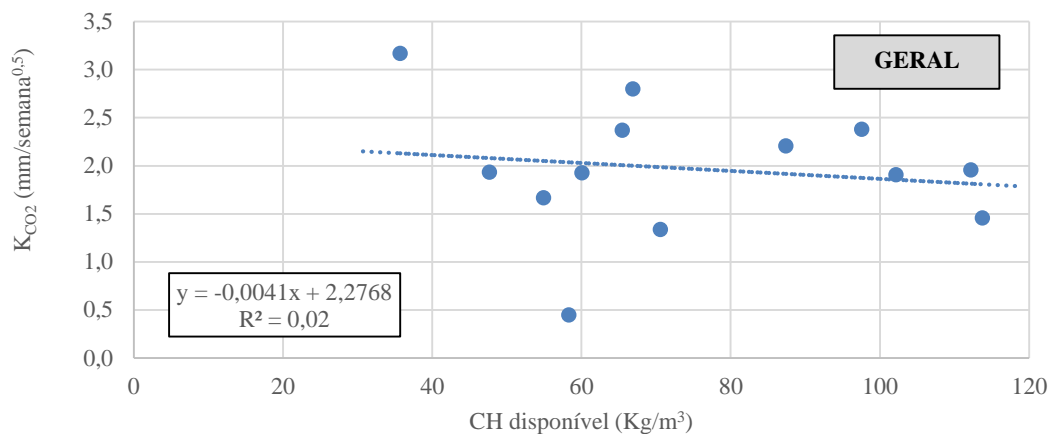


Figura 80 – Relação entre o coeficiente de carbonatação (K_{CO_2}) e a cal disponível (indicativo de reserva alcalina).

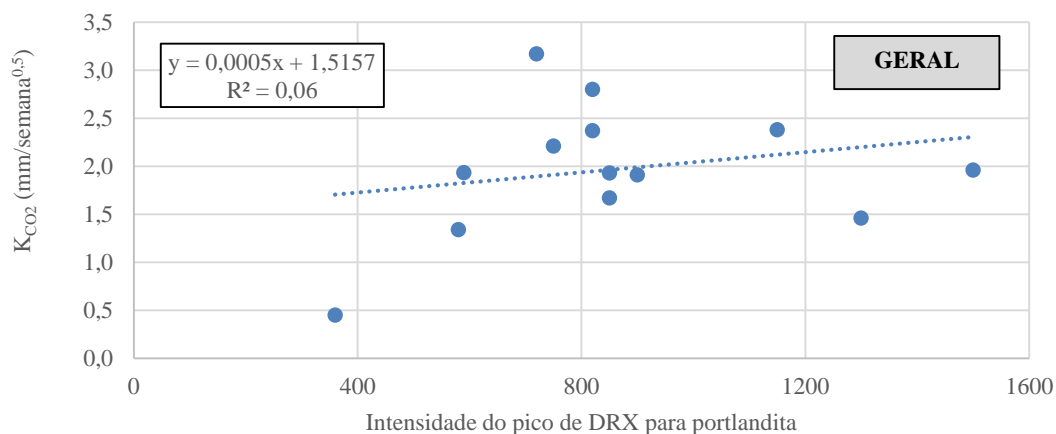


Figura 81 – Relação entre o coeficiente de carbonatação (K_{CO_2}) e a intensidade do pico principal da portlandita, localizado na região de $34,2^\circ 2\theta$ nos respectivos difratogramas (indicativo de reserva alcalina).

4.7.3.2 Comparações entre a resistividade elétrica, resistência à compressão e sorvidade:

A Figura 82 indica a relação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para os concretos avaliados nesta pesquisa. Deve-se notar que os valores de R^2 variaram entre 0,07 e 0,18, indicando uma correlação muito fraca entre os dados. Além disso, o comportamento foi distinto entre o gráfico de substituição e o de adição, indicando não existir uma relação clara entre as duas grandezas comparadas.

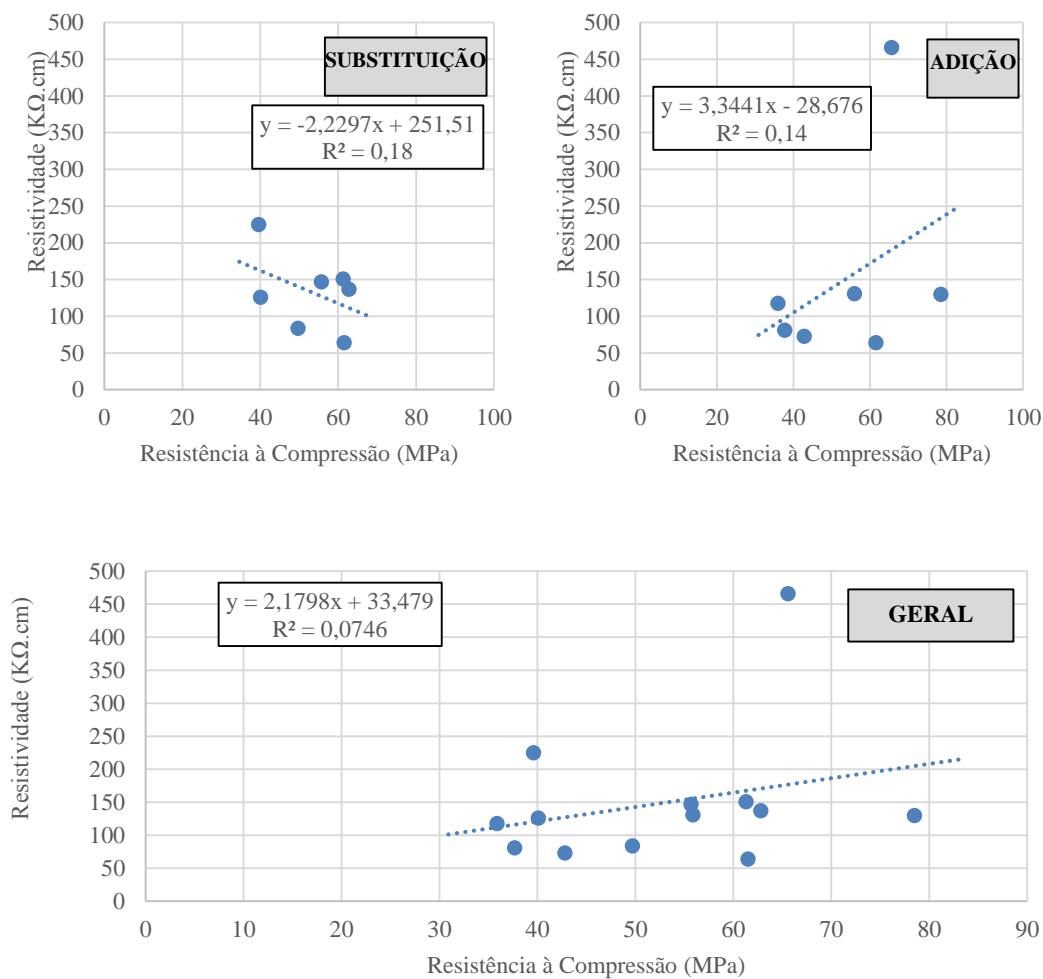


Figura 82 - Relação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão.

A Figura 83 mostra a relação entre os dados de resistividade elétrica superficial e os de sorvidade. Mais uma vez o comportamento apresentado é inverso entre o caso de substituição e o de adição indicando relação de dados em sentidos opostos. Os valores de R^2 ficaram entre 0,04 e 0,48, também indicando fraca relação entre as duas grandezas comparadas.

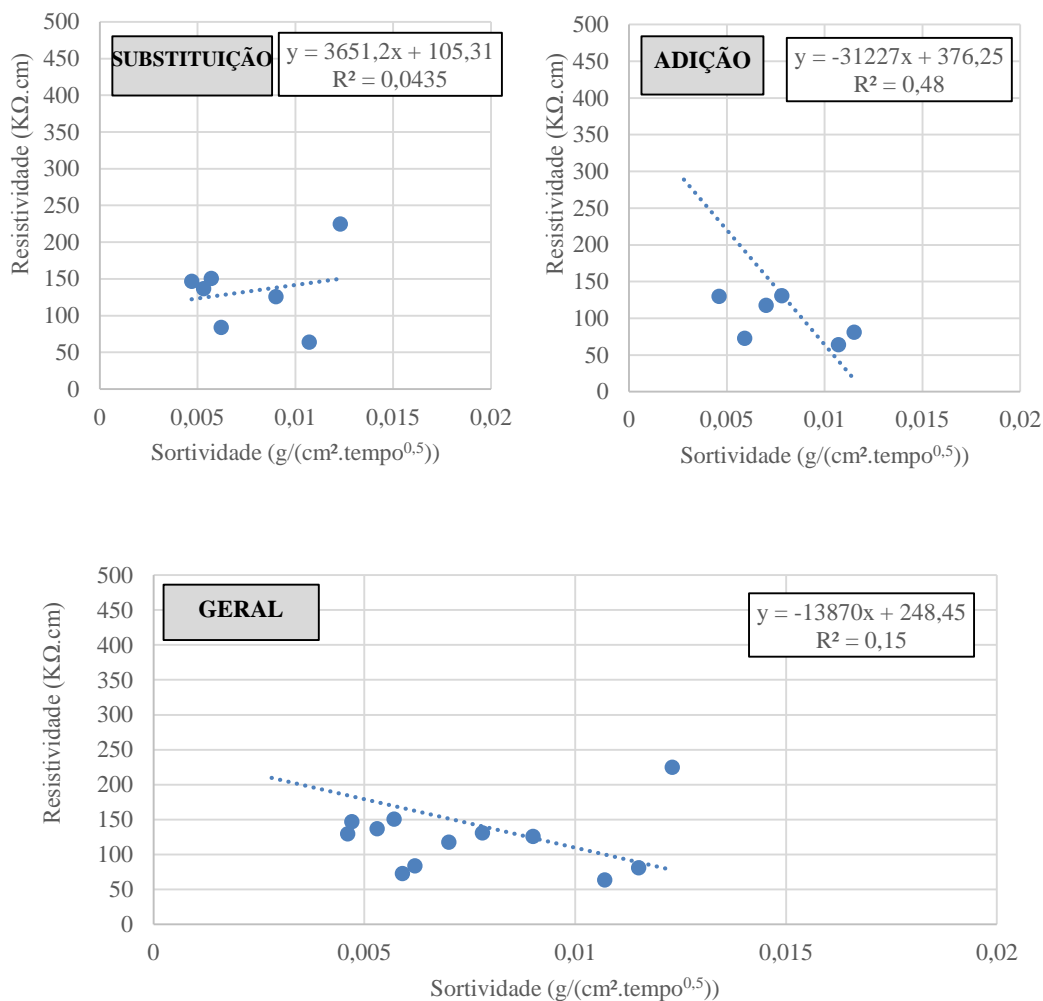


Figura 83 - Relação entre a resistividade elétrica superficial e a sorvidade.

A Figura 84 mostra a relação entre a resistência à compressão e a sorvidade. De modo geral, os três gráficos indicam relação inversa entre estas duas grandezas, porém o R^2 variou entre 0,22 e 0,34, indicando que a relação entre estes dois ensaios é fraca. Isso confirma que a resistência à compressão não regula sozinha propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto, como é o caso da absorção de água por capilaridade.

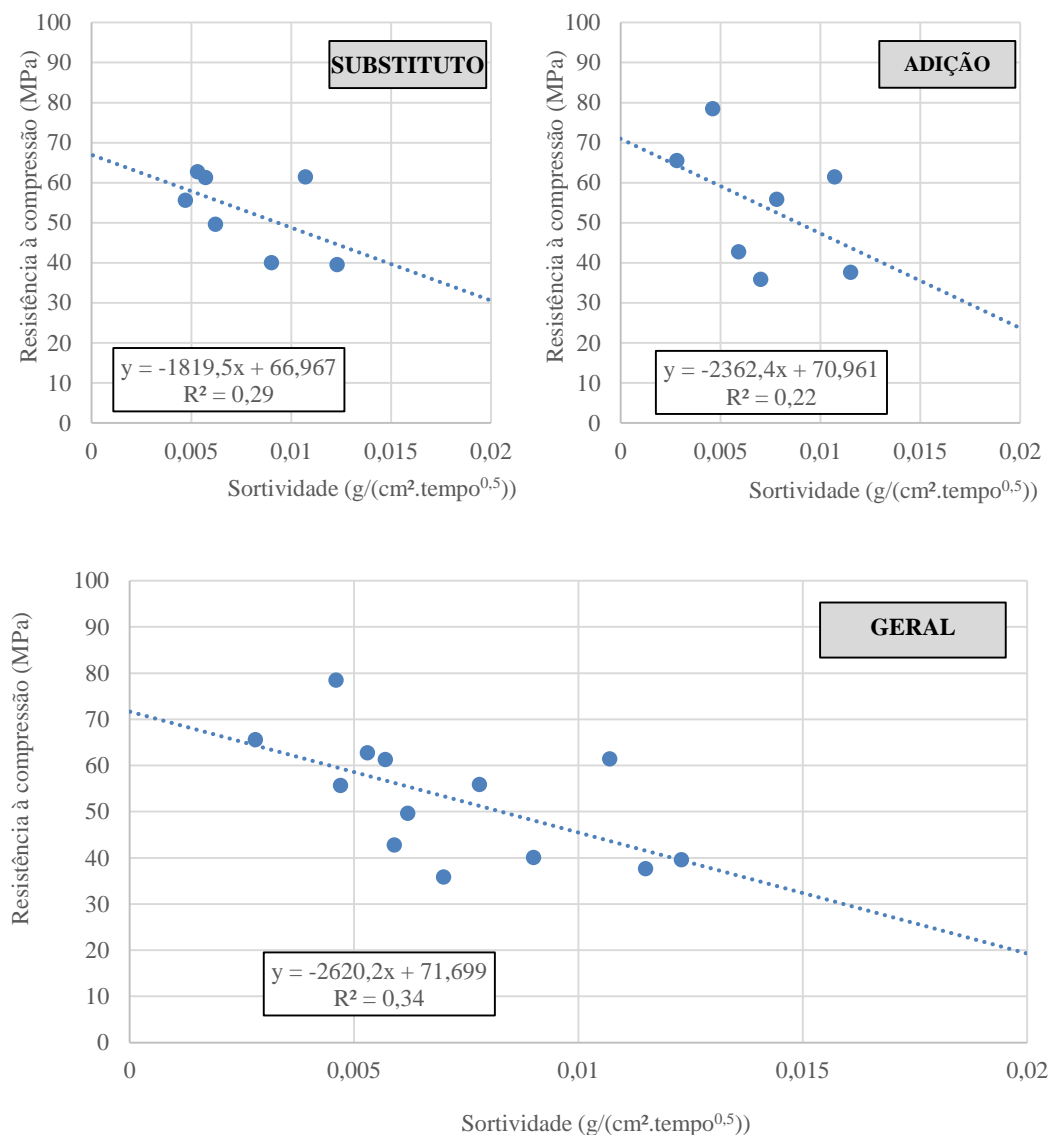


Figura 84 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão.

4.7.3.3 Tentativa de estabelecer um índice de relação com a velocidade de carbonatação

Nesta fase do trabalho tentou-se propor um índice que se relacione com o coeficiente de carbonatação. Isso foi tentado devido ao fato que a comparação de todas as grandezas medidas com a velocidade de carbonatação, representada pelo valor de K_{CO_2} , resultaram em valores de R^2 baixos indicando que nenhum dos resultados de ensaio deste programa de experimento é capaz, isoladamente de explicar o K_{CO_2} .

A Figura 85 foi a primeira tentativa de estabelecer um índice de correlação e ele foi montado de forma simples envolvendo uma relação da resistência à compressão com a sorvidade, dois dos principais parâmetros de influência do K_{CO_2} . O índice proposto é o $K_{fc/sor}$ e decidiu-se colocar a resistência à compressão como numerador por ter relação direta com o K_{CO_2} e a absorção de água foi incluída no denominador por apresentar relação inversa com o K_{CO_2} . Então, esta foi uma tentativa de propor um índice que possa ter nele embutidos os dados destes dois parâmetros e foi avaliado se o valor de R^2 indica correlação forte entre o índice proposto e o K_{CO_2} . A Equação 12 indica como é o cálculo de $K_{fc/sor}$.

$$K_{fc/sor} = \frac{\text{Resistência à compressão (MPa)}}{\text{Sortividade } \left(\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{\text{semana}}} \right)} \quad \text{Equação 12}$$

Pode-se notar pela Figura 85 que, apesar de para o caso da substituição R^2 ter sido 0,44, para o caso de comparação geral e o caso da adição, os valores de R^2 foram 0,67 e 0,68, respectivamente. Estes valores são os maiores de todas as comparações realizadas em todas as tentativas de relações até o momento. Desse modo, pode-se considerar que este é um indício de que o índice $K_{fc/sor}$ melhorou a correlação com o K_{CO_2} . Contudo, o valor de R^2 acima de 0,7 ou 0,8 é desejável para que o índice proposto seja mais completo no que se refere a correlacionar com o coeficiente de carbonatação, como é o intuito desta etapa do trabalho.

A segunda tentativa de propor um índice de correlação foi introduzir a relação água/cimento no índice anterior e como a relação a/c tem relação inversa com o K_{CO_2} este parâmetro foi introduzido no denominador, como consta na Equação 13.

$$K_{fc/\left(\frac{a}{c} \cdot sor\right)} = \frac{\text{Resistência à compressão (MPa)}}{\frac{a}{c} \cdot \text{Sortividade } \left(\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{\text{semana}}} \right)} \quad \text{Equação 13}$$

Como pode ser verificado na Figura 86, este novo índice elevou o R^2 da comparação geral para 0,75 que já indica um nível de correlação elevado evidenciando que agregar a informação da relação a/c foi importante para a elevação da acurácia do índice em termos de explicar o coeficiente de carbonatação, que é um parâmetro de velocidade de avanço da frente de carbonatação.

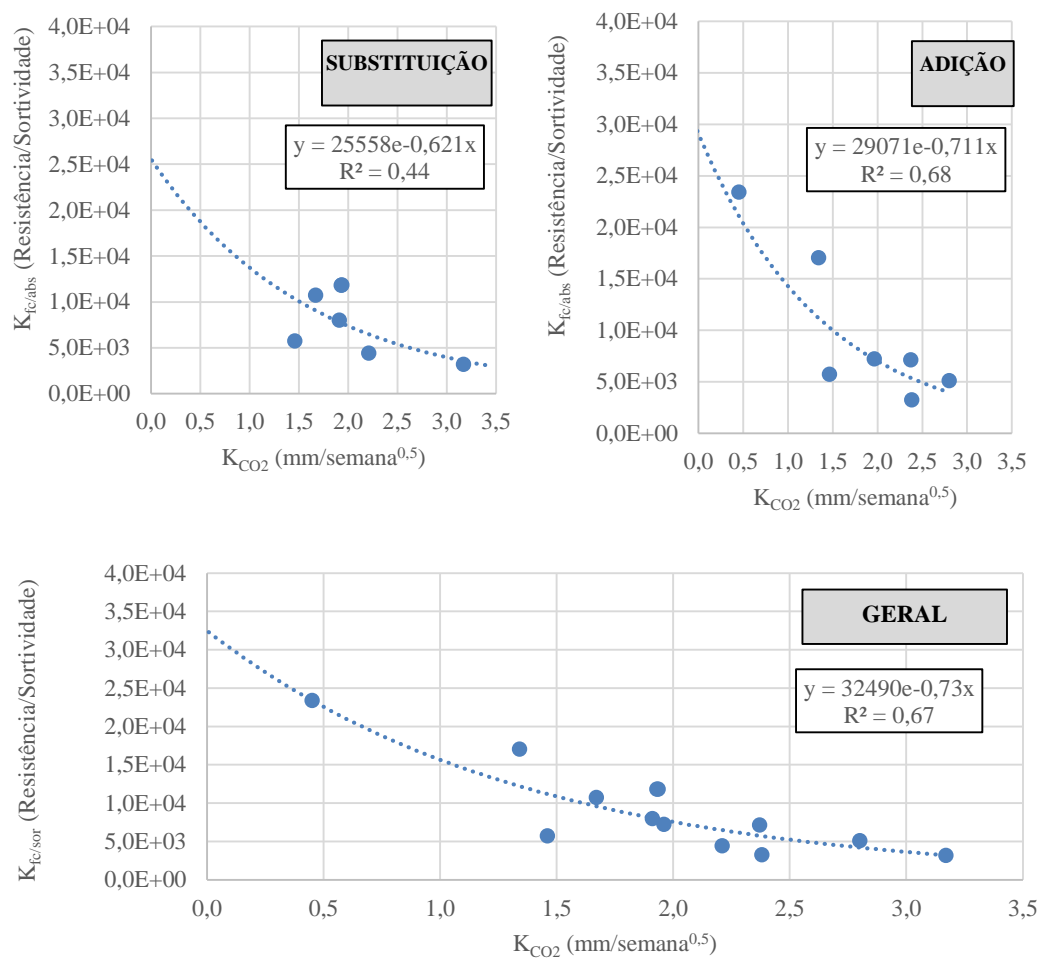
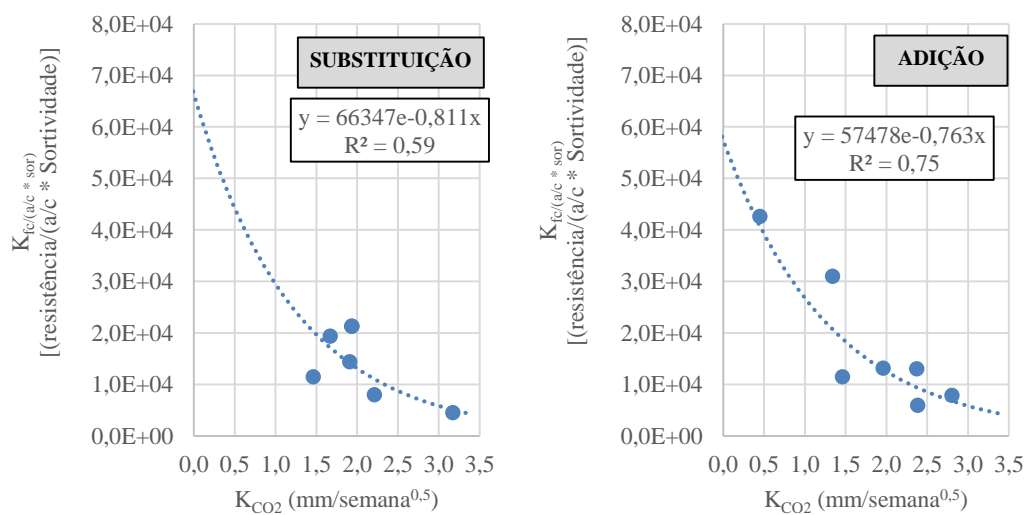


Figura 85 - Relação entre $K_{fe/abs}$ e K_{CO2} .



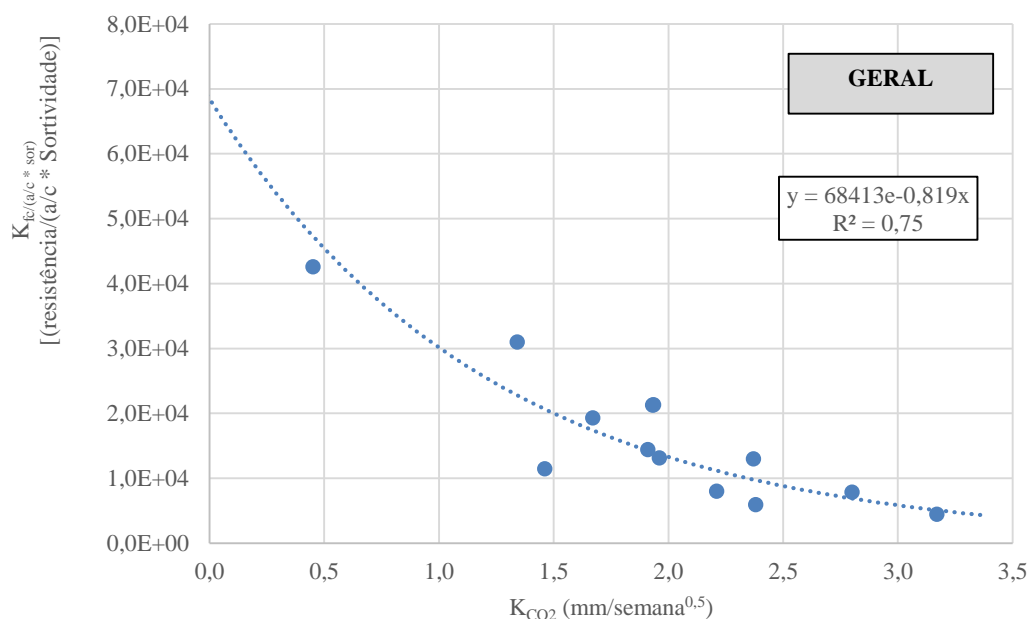


Figura 86 - Relação entre $K_{fc}/(a/c \cdot sor)$ e K_{CO_2} .

A terceira tentativa de aprimorar o índice foi agregar a informação da reserva alcalina e considerando que quanto maior a reserva alcalina, menor a carbonatação, o valor da reserva alcalina teórica foi colocado no numerador, como indicado na Equação 14.

$$K_{(fc-reserva)/(a/c \cdot sor)} = \frac{\text{Resistência à compressão (MPa)} \cdot \text{Res.Alcalina} \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{\frac{a}{c} \cdot \text{Sortividade} \left(\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{semana}}\right)} \quad \text{Equação 14}$$

Este novo índice apresenta maior correlação com a carbonatação corroborando com o fato de que a consideração da reserva alcalina é importante para tentar explicar a carbonatação. Deve-se destacar que houve elevação de R^2 para valores acima de 0,80 nos casos de comparação isolada da substituição e adição e no caso da comparação geral o R^2 foi 0,79, muito próximo de 0,80. Estes valores de R^2 já apontam uma forte correlação, de modo que fica evidente que os quatro parâmetros (resistência à compressão, reserva alcalina, relação água/cimento e absorção de água por capilaridade) apresentam influencia relevante no coeficiente de carbonatação.

A generalização de $K_{(fc-res.alcalina)/(a/c \cdot sor)}$ para outros concretos deve ser estudada em outras pesquisas, então, deve-se ter certa cautela quando for usar o modelo proposto em concretos produzidos com materiais distintos aos deste trabalho. Porém, a ideia de propor o modelo é útil porque ele pode ser um caminho para viabilizar estimativas da capacidade de proteção quanto à carbonatação sem necessariamente executar um ensaio

de carbonatação acelerada, um ensaio caro, demorado e que envolve infraestrutura que existe em poucos laboratórios do Brasil.

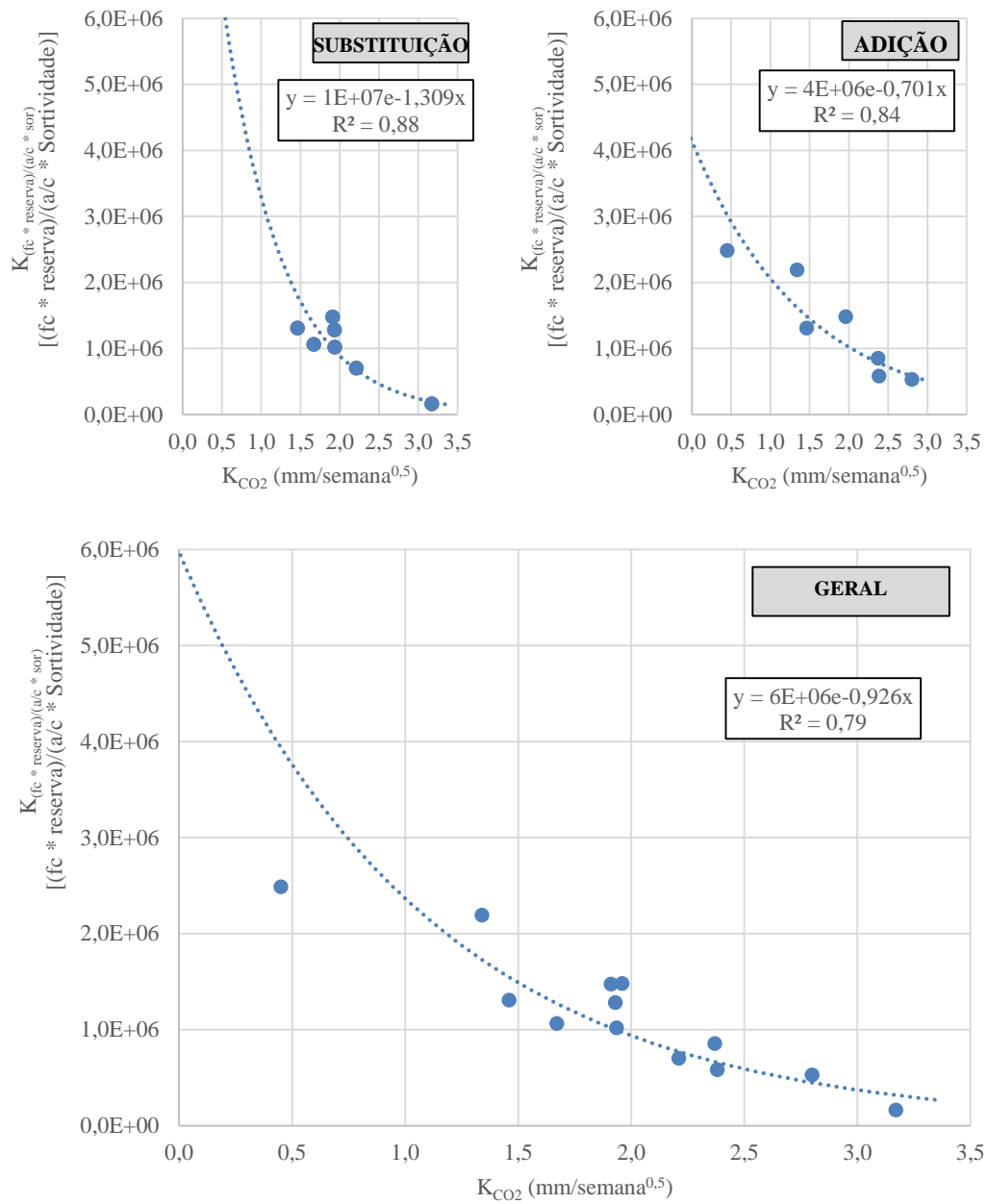


Figura 87 - Relação entre $K_{(fc \cdot reserva)/(a/c \cdot sor)}$ e K_{CO_2} .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa experimental foi possível estabelecer as conclusões a seguir:

- A reserva alcalina, seja representada pela intensidade dos picos de portlandita no ensaio de DRX ou pelo teor de hidróxido de cálcio teórico, não explica de forma completa e individual a carbonatação de modo que a correlação entre a reserva alcalina e o coeficiente de carbonatação foi baixa com R^2 igual a 0,02 e 0,06.
- A resistência à compressão apresentou relação inversa com o coeficiente de carbonatação, porém com R^2 mediano, igual a 0,57, indicando que a resistência à compressão não controla sozinha o processo de carbonatação.
- A resistividade elétrica superficial não apresentou boa correlação com os resultados de carbonatação, apresentando R^2 igual a 0,22. Além disso, quando fez-se a avaliação separada por adição e por substituição, a tendência do efeito da resistividade elétrica na carbonatação foi em sentidos opostos, indicando que este parâmetro não foi eficiente em se relacionar com o processo de carbonatação.
- A sorvidade indicou relação direta com o coeficiente de carbonatação, ou seja, quanto menor a sorvidade, menor a carbonatação. Porém, a relação entre os resultados é relativamente fraca com R^2 igual a 0,43, indicando que este parâmetro sozinho não é apropriado para a previsão ou estimativa da velocidade de carbonatação.
- Em todas as adições minerais, quando dosadas em substituição parcial ao cimento Portland, tiveram a resistência a carbonatação reduzida, mas em contrapartida a resistividade elétrica aumentou. Logo, embora exista uma aceleração do processo da carbonatação, deve-se considerar que a cinética da corrosão de armaduras, quando estiver instalada, será menor.
- No caso do uso das adições minerais como adição ao cimento Portland, a maior parte das adições também indicaram aumento no coeficiente de carbonatação. As duas exceções foram o metacaulim, que apresentou o coeficiente de carbonatação um pouco inferior à série de referência (8%

de redução no K_{CO_2}) e a sílica ativa que reduziu o K_{CO_2} em 69%, indicando forte capacidade de redução da velocidade de carbonatação.

- Seguindo uma linha de raciocínio exposta anteriormente, foi possível propor um índice de correlação com a velocidade de carbonatação, para as condições de carbonatação realizadas no presente trabalho. O intuito deste índice é que, caso um usuário precise estimar a velocidade de carbonatação do concreto, mas não tenha acesso a um laboratório equipado com uma câmara de carbonatação, possa usar um modelo alimentado por dados indiretos e obter uma estimativa do resultado de carbonatação. O índice proposto neste trabalho foi designado $K_{(fc \cdot res.alcalina)/(\frac{a}{c} \cdot sor)}$ e relaciona os parâmetros: resistência à compressão, reserva alcalina, relação água/cimento e sorvidade. Considerando todos os concretos deste estudo, o $K_{(fc \cdot res.alcalina)/(\frac{a}{c} \cdot sor)}$ apresentou R^2 igual a 0,79 que é um valor que indica boa correlação e foi melhor do que qualquer tentativa de relacionar o K_{CO_2} com algum resultado de ensaio isolado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abriu uma série de dúvidas, que podem ser traduzidas em sugestões para trabalhos para a continuidade desta linha de pesquisa. A seguir apresentam-se algumas sugestões:

- Estudo do efeito da adição e substituição parcial do cimento por adições minerais comparando concretos de mesma resistência à compressão com relação ao efeito da carbonatação;
- Efeito da finura da cinza volante no desempenho quanto à carbonatação;
- Comparação de hidratação em condições ideais de laboratório e em condições de cura aplicadas comumente em obra em termos de proteção quanto à carbonatação;
- Estudo de adições não convencionais e com caráter de sustentabilidade e seu efeito na velocidade de carbonatação do concreto;
- Estudo de diferentes microclimas e seu efeito na velocidade de carbonatação do concreto;
- Estudo de formas de reverter a carbonatação aplicando e/ou desenvolvendo técnicas e materiais de realcalinização;
- Comparação de formas de condicionamento prévio dos corpos de prova antes da entrada na câmara de carbonatação acelerada;
- Estudo do efeito da magnitude da reserva alcalina e do teor de pasta na velocidade de carbonatação do concreto.

5.3 ATUAÇÃO EM PUBLICAÇÕES

Durante o período de atuação no mestrado alguns trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos e resultaram nas publicações listadas a seguir:

- Artigos de revista:

RAISDORFER, J. W.; PAIM, A. S.; SANTOS, I. M. R.; PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. Caracterização de concretos tratados com produtos cristalizantes para impermeabilização de piscinas com tratamento de água a base de cloreto de sódio. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, p. 111-123, 2013. (Qualis B4)

- Artigos em anais de congressos:

SANTOS, I. M. R.; RAISDORFER, J. W.; HOFFMANN, L.; MEDEIROS, M. H. F. Influência da adição de nanotubos de carbono e de cinza volante no calor de hidratação do concreto. In: 1. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2014, Foz do Iguaçu. 1. **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**. Porto Alegre: Alconpat, 2014. v. Único. p. 1-15.

RAISDORFER, J. W.; MEDEIROS, M. H. F. Análise hierárquica para determinação de argamassa de reparo para um elemento comprimido atacado por CO₂ e livre de cloretos. In: Simpósio sobre Materiais e Construção Civil, 2013, Toledo. **Simpósio sobre Materiais e Construção Civil**. Toledo: UTFPR, 2013. v. único. p. 1-10.

- Capítulos de livro:

FERREIRA, A.; PEREIRA, E.; RAISDORFER, J. W.; MEDEIROS, M. H. F.; KLEIN, N. S. CAPÍTULO 7 - Efeito da carbonatação na Durabilidade do Concreto Armado. In: Lúcia Bressiani; Cristiano Poletto. (Org.). **Tópicos Especiais em Construção Civil**. 1ed. Toledo: UTFPR, 2014, v. único, p. 123-144.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais.** – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1998.

ALVES, J. D. **Manual de Tecnologia do Concreto** – 3ª edição, Editora UFG, Goiânia, 1993.

AMPADU, K. O.; TORII, K.; KAWAMURA, M. – Beneficial effect of fly ash chloride diffusivity of hardened cement paste – **Cement and Concrete Research**. v. 29, n. 4, p. 585-590, abril de 1999.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Técnicas eletroquímicas cuali y cunativas para medir los efectos de las adiciones sobre a la corrosion de las armaduras. – **Materiales de Construcción**, n. 182, 1981.

ANDRADE, C.; GONZÁLES, J. A.; FELIÚ, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part 1: When, how and how much steel corrodes, **Materials and Structures**, vol. 29, p. 40-46, janeiro-fevereiro 1996.

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernanbuco.** – Dissertação de mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolâncios – Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5736** – Cimento portland pozolânico – Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5739** – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 11578** – Cimento Portland Composto – Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 9779** – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade – Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15895:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash - **Construction and Building Materials**, v. 17, n. 3, p. 147-152, abril, 2003.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes** – Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2002

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review – **Construction and Building Materials** – v. 15, n. 2-3, p. 93-100, março-abril, 2001.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concretos de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim** – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARDAR, M. S.; KUPWADE-PATIL, K.; BARNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; ALLOUCHE, E. N. Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes - **Construction and Building Materials** v. 61, p. 79-89, junho, 2014.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escoria de alto forno e ativador químico.** – Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2008

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A.; DUXSON, P.; VAN DEVETER, J. S. J. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimating service life: The role of pore solution chemistry – **Cement and Concrete Research** v. 42, p. 1317-1326, 2012.

BERNAL, S. A.; NICOLAS, R. S.; MYERS, R. J.; GUUTIÉRREZ, R. M., PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders - **Cement and Concrete Research** v. 57, p. 33-43, março, 2014.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos** - Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2001.

CABRERA, J.; ROJAS, M. F. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system – **Cement Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 177-182, February, 2001.

CADORE, W, W, **Estudo da Carbonatação da Camada de Cobrimento de Protótipos de Concreto com Altos Teores de Adições Minerais e Cal hidratada** – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas** – Editora Pini, 1997.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto** – Concreto: Ciência e Tecnologia. – São Paulo: IBRACON, 2011. V1. pp. 849-883.

CASTRO, A. **Influência das adições Minerais na Durabilidade do Concreto Sujeito à Carbonatação** – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás – Goiânia, 2003.

CHANDRA, S.; CERWALL, K.; NILSSON, I. H. E. Durability problems in Swedish concrete bridges – case studies. – **Symposium on durability of concrete**, 1994.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA – **Resolução 307**, 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 1, cap. 08 pg. 233-260, São Paulo, 2011

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J. A.; OLIVEIRA, A. P. N. – Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida de casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz – **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1175-1179, São Paulo, 2006.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. – Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica – **Química Nova**, v. 24, n. 6, pg. 788-782, 2001.

DUPRAT, F.; VU, N. T.; SELIER, A. Accelerated carbonation tests the probabilistic prediction of the durability of concrete structures – **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 597-605, september, 2014.

ESTES, A. C.; FRANGOPOL, D. M. Minimum expected cost-oriented optimal maintenance planning for deterioration structures: application to concrete bridges decks – **Reliability Engineering and System Safety**, v. 73, n. 3, p. 281-291, 2001.

FERREIRA, A.; PEREIRA, E.; RAISDORFER, J. R.; MEDEIROS, M. H. F.; KLEIN, N. S. **Efeito da Carbonatação na Durabilidade do Concreto Armado** – Tópicos em Construção Civil – Capítulo 07, Toledo/PR, 2014.

FIGUEREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; O. CASCUDO; CARASECK. H; CACHIM, P. VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos a ação deletéria de cloretos – **Revista Ibracon Estruturas e Materiais** vol. 7 n. 4 , São Paulo, 2014.

FRANGOPOL, D. M.; LIN, K. Y.; ESTES, A. C. Life-cycle cost design of deterioration structures. – **Journal of Structural Engineering**, v. 123 p. 1390-1401, October, 1997.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A.; FELIU, S. JR; ANDRADE, M. C. Possibilities of the Guard Ring for Electrical Signal Confinement in the Polarization Measurement of Reinforcements. – **Corrsion**, v. 46, n. 12, p. 1015-1020, December 1990.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio na absorção capilar do concreto** – Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Santa Maria, 2001

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 2º edição, Pini, 2008.

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N. A.; SALLEH, M. A. M. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete – **Construction and Building Materials** – v.24, n. 11, p. 2145-2150, November, 2010.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma análise crítica a partir de métodos complementares** – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

HARRISON, T. A.; JONES, M. R.; NEWLANDS, M. D.; KANDASAMI, S.; KHANNA, G. Experience of using the pr TS 12390-12 accelerated carbonation test to assess the relative performance of concrete – **Concrete Research**, v. 64, n. 8, p. 737-747, 2012.

HEWLETT P. C. LEA'S **Chemistry of Cement and Concrete**, Fourth Edition, Oxford, United Kingdom, 2006.

HEEDE, V.; BEILE, N. A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation. – **Construction and Building Materials** – v.55, p. 183 - 193, March, 2014.

HELENE, P. R. L.; **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** – (Tese de Livre Docência) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and concrete Research**, v. 17, n.3, p. 489-504, May, 1987.

HOPPE FILHO, J.; **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto** – (Tese de doutorado) – Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ASCE, M.; ISAIA, G. C. High-volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 25, n. 3, p. 411-418, March, 2013.

HOPPE, T. **Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz** (Dissertação de mestrado) – Porto Alegre, 2005.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H.; Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation – **Cement and Concrete Research** – v.32, n.12, p. 1923-1930, 2002.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** v. 1, 2º ed., São Paulo, 2010

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: estudo de caso – **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 19-30, Porto Alegre, 2004.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L.; MEIRA, L.; DUART, M. ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte 1: propriedades mecânicas e microestrutura – **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, p. 121-137, 2010.

Jl, Y.; YUAN, Y.; SHEN. J.; MA, Y.; LAI, S. Comparison of concrete carbonation process under natural condition and high CO₂ concentration environments – **Journal of Wuham University of Technology**, v. 25, n. 3, p. 515-522, 2010.

JUENGUER, M. C. G.; OSTERTAG, C. P. Alkali-silica reactivity of large sílica fume-derived particles – **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p 1389-1402, August 2004.

KIRCHHIM, A. P. **Aluminatos tricálcio cúbico e ortorrômbico: análise de hidratação in situ e produtos formados** – Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2008.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. - Concreto branco – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON, 2011.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa** – Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research** – v. 33, n. 12 pg. 1939-1947, December, 2003.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da Cana-de-Açúcar: Avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão – **Ambiente Construído** – Porto Alegre, v. 11, nº 2, p. 201-212, 2011.

MAEKAWA, K.; ISHIDA, T.; KISHI, T. Multi-scale modeling of Concrete performance – **Journal of Advanced Concrete Technology** – Japan concrete Institute Vol.1, n. 2, p. 91-126, july 2003.

MALHEIRO, R.; CAMÕES, A.; FERREIRA, A.; MEIRA, G. AMORIM, T.; REIS, R. Evolução da frente de carbonatação em argamassas contendo cinzas volantes tendo em conta a presença de íons cloreto – **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, Guimarães, Portugal, 2014.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious materials** – Gordon and Breach Publishers – Amsterdam, 1996.

MANGABEIRA, A. P. A. **Avaliação do efeito da porosidade nas etapas de beneficiamento de minério de ferro da Samarco** (Dissertação de mestrado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009

MARTINES, P. M. **Concreto com adição de Borracha, sucatas de pneus- Uma abordagem do módulo de elasticidade** (Trabalho de conclusão de Curso), Paraná – Universidade Tecnológica do Paraná, Campo Mourão, 2013.

MAX, R.; MEIRA, G.; PADILHA, M. Carbonatação de Concretos em atmosfera urbana na região de João Pessoa – **Anais do II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica** - João Pessoa, 2007.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto** – (Tese de Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F. Estudos de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado – **Engenharia Civil UM** (Braga), Guimarães – Portugal, v. 12, p. 55-64, 2001.

MEDEIROS JR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, “em prelo”, 2014.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio** – Dissertação de mestrado – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2011

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013

MORAES, R. C. **Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto** – Dissertação de mestrado – Universidade de Santa Maria – Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.

MUTHADHI, A.; KOTHANDARAMAN, S. Optimum production conditions for reactive rice husk ash – **Material and Structures**. V 43, p. 1303-1315, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pine, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROKS, J. J. **Tecnologia do concreto**, 2ª edição, editora Bookman, Porto Alegre, 2013.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos** – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.

OLIVEIRA, M. P. **Estudo de um caulim calcinado do Estado da Paraíba como material de substituição parcial do cimento Portland** – Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – centro de ciências e tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande. 2004.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing material on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. – **Cement and concrete Research**, v. 30, nº 2, p 291-299, february, 2000.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYANAS, C. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 119-130, 1992.

PAULETTI, C **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** – (Dissertação de mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C; Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil – **Ambiente Construído** – Porto Alegre, v.7, nº 4, p. 7 - 20, 2007.

PESSÔA, P. O. A.; NEPOMUCENO, A. A. Influência da reserva alcalina na fase de iniciação e propagação da corrosão em argamassas com baixa relação água/cimento – **XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural**, 2002.

PINA, F. B. C. **Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para estruturas em betão armado** – Dissertação de mestrado – Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; FREZZATTI, L.; SAVASTANO JR, H.; TONOLI, G. H. D. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites – **Minerals Engineering** v. 59, p. 101-106, may, 2014.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado** – (Dissertação de mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da Carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano** – (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico** – (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2006.

RAISDORFER, J. W.; MEDEIROS, M. H. F. Monitoramento contínuo das estruturas a partir da resistividade elétrica – **Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto**, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D’ESSAIS DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS - RILEM Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM CPC-18. **Materials and Structures**, v. 21, n. 6, p. 453-55, 1988.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D’ESSAIS ET MATERIAUX. TC116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions** n. v.32, p. 174-179, 1999.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. Efeito da adição de lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas

eletroquímicas – **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais** – v. 5, nº 4, São Paulo 2012.

ROCHA, L.; PERES, A.E.C. Aproveitamento econômico das lamelas de ferro – **Revista Escola de Minas**. V.62, Nº3, p. 291-295, 2009.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H. JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa – **Cerâmicas** v. 54, p 456-461, 2008.

SANTOR, M S.; GASTALDINI, A. L. G.; CRAUSS, C.; SANTOS, G.T.; ROSSINI, F. C. Influência de materiais de proteção na resistividade elétrica do concreto – **Revista ALCONPAT** – V. 2 –n.1 p. 47 – 57, 2012.

SANTOS, Í, M, R.; RAISDORFER, J. W.; HOFMMANN, L.; MEDEIROS, M. H. F. Influência da adição de nanotubos de carbono e de cinza volante no calor de hidratação do concreto – **ALCONPAT BRASIL, Anais do 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, Foz do Iguaçu, Paraná, 2014.

SANTOS, L. **Avaliação de resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto** – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2006.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON, v.1. p. 809-848, 2011.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials** – Springer editor, Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos** – (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da Influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência** – (Tese de doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, J. E.; MALLMANN, O. Z. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico – **Cerâmica**, vol 45, n. 296, São Paulo, 1999.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concrete containing high volume of pozzolanic materials – **Cement and Concrete Research** v. 37, n. 17, p. 1647-1653, December, 2007.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos** – (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

STACHERA JUIOR, T. Avaliação de Emissões de CO₂ na construção civil: Um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná – **Anais do XXVIII Encontro nacional de Engenharia de produção**, Rio de Janeiro, 2008.

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H.; - Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures – **Cement and Concrete Research** v. 32, n. 6, p. 935-941, june, 2002.

STUMPP, M. J **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada** – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2003.

TEYLOR, H.: **Cementy chemistry** – Second Ed., Thomas Telford, London, 1997.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete** – Swedish Cement and Concrete Research, institute, Stockholm, 1982.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozzolânica – **Ambiente Construído**, v.12, nº 2, p. 151-163, Porto Alegre, 2012.

UNE 83988-2 - **Determinación de la Resistividade Eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner**, Norma Espanola, 2012.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, A. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to matakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: a laboratory study – **Construction and Building materials**, v. 41, p. 879 – 888, april, 2013.

VERA, R.; VENEGAS, R.; CARVAJAL, A. M.; CORVO, F.; PÉREZ, T. Performance of carbono steel and galvanized steel in reinforced concrete structures after accelerated carbonation – **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, p. 10722-10734, 2012.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco** – (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; AIT-MOKHTAR, A.; STAQUET, S. Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying – **Cement and Concrete Research** v 43, p. 25-33, 2013.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; BATIC, O. R.; ISAIA, G. C. Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. **Construction and Building Materials**. nº 36, 796-806, p 796-806, 2012.

7 ANEXOS

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram caracterizados pelo grupo de estudos do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná e estão sendo utilizados em várias pesquisas que estão acontecendo dentro do programa.

7.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO GERAL

Tabela 17 – Média das leituras de fenolftaleína

Semanas	1	4	8	12
Referência	0,705	1,485	4,343	5,718
SD	0,144	0,475	0,671	0,666
Sub . S. Ativa	1,802	2,345	5,413	6,683
SD	0,564	0,458	1,222	0,598
Ad. S. Ativa	0,000	0,145	0,637	0,902
SD	0,000	0,169	0,321	0,421
Sub. Metacaulim	1,935	2,707	4,750	7,075
SD	0,590	0,617	0,829	0,755
Ad. Metacaulim	0,000	0,972	2,703	3,117
SD	0,000	0,653	0,600	0,404
Sub . S.C. Arroz	0,990	3,395	4,500	5,957
SD	0,271	0,684	1,119	0,473
Ad. S.C. Arroz	1,623	3,690	7,275	8,088
SD	0,343	0,917	1,484	0,507
Sub. Quartzo	0,865	3,150	5,632	6,623
SD	0,284	0,448	0,883	0,516
Ad. Quartzo	1,605	3,720	5,805	6,797
SD	0,452	0,490	0,990	0,264
Ad. C.Vol10%	2,093	3,883	6,140	9,090
SD	0,471	0,323	0,629	0,806
Sub C.Vol10%	2,272	3,032	6,890	7,430
SD	0,455	0,537	1,201	0,281
Sub C.Vol30%	2,413	6,938	9,330	10,570
SD	0,969	0,966	0,735	0,339
Ad. C.Vol30%	2,167	5,462	7,478	10,323
SD	0,606	1,017	0,748	0,341

7.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA GERAL

Tabela 18 – Resistividade elétrica média encontrada em cada leitura

Datas	7d	28d	P. Carb	1s	4s	8s	12s
Referência	82,750	109,197	158,758	104,733	164,833	319,683	357,333
SD	3,627	5,113	7,102	5,817	9,055	28,605	35,048
Sub. S. Ativa	56,583	402,150	1032,850	572,467	901,833	734,500	1219,000
SD	2,187	14,935	108,574	37,572	82,468	84,081	95,109
Ad. S. Ativa	177,983	152,250	4136,667	2820,833	3571,333	2793,500	5058,333
SD	5,315	6,887	208,456	111,947	313,730	212,051	311,863
Sub. S. C. Arroz	67,467	--	402,367	354,167	928,167	906,167	1497,500
SD	3,338	--	22,377	28,327	73,005	98,062	305,082
Ad. S. C. Arroz	52,933	156,000	279,067	285,333	640,917	652,833	1362,500
SD	2,221	6,593	8,247	25,009	48,350	102,412	258,285
Sub. Metacaulim	91,683	220,600	319,967	267,367	487,167	819,400	1155,333
SD	3,212	8,685	13,711	16,533	28,446	93,970	88,739
Ad. Metacaulim	161,817	267,700	420,733	382,800	580,683	779,000	--
SD	4,890	8,506	12,339	15,570	33,982	70,288	--
Sub. F. Quartzo	64,850	86,017	142,100	124,983	334,667	502,500	3307,667
SD	2,608	4,601	5,973	9,518	33,004	44,744	521,125
Ad. F. Quartzo	56,667	72,167	114,550	89,817	235,383	363,833	2648,333
SD	2,769	3,794	4,733	7,613	29,435	34,624	283,493
Sub. C. Volan							
10%	48,250	75,133	165,267	155,400	339,333	756,833	1200,333
SD	1,670	3,291	7,702	10,341	34,590	173,524	166,816
Ad. C. Volan							
10%	45,517	65,467	146,933	135,767	382,667	486,000	1097,500
SD	1,541	2,325	7,680	13,587	47,109	81,933	163,397
Sub. C. Volan							
30%	50,750	99,183	231,983	247,933	673,833	1124,333	4338,667
SD	2,663	4,848	8,644	15,698	81,362	270,698	890,356
Ad. C. Volan							
30%	45,300	73,150	148,767	190,067	536,333	708,500	4466,500
SD	1,518	2,430	5,634	12,769	48,507	65,756	413,749

7.4 ABSORÇÃO CAPILAR GERAL

Tabela 19 – Média das leituras de absorção Capilar

Tempo	3h	6h	24h	48h	72h
Referência	0,1521	0,2129	0,3356	0,4053	0,4191
SD	0,0177	0,0314	0,0459	0,0506	0,0473
Sub. Metacaulim	0,1508	0,2017	0,3267	0,3903	0,4257
SD	0,0059	0,0104	0,0209	0,0279	0,0300
Ad. Metacaulim	0,1315	0,1745	0,2826	0,3399	0,3743
SD	0,0011	0,0023	0,0043	0,0085	0,0124
Sub S. Ativa	0,1096	0,1444	0,2578	0,3188	0,3499
SD	0,0177	0,0243	0,0391	0,0522	0,0579
Ad. S. Ativa	0,0827	0,1042	0,1677	0,2150	0,2222
SD	0,0031	0,0038	0,0042	0,0043	0,0116
Sub F. Quartzo	0,1418	0,2032	0,3415	0,4291	0,4616
SD	0,0130	0,0131	0,0184	0,0383	0,0530
Ad. F. Quartzo	0,1508	0,2017	0,3267	0,3903	0,4257
SD	0,0059	0,0104	0,0209	0,0279	0,0300
Sub S. C. Arroz	0,1557	0,2211	0,3414	0,4193	0,4609
SD	0,0048	0,0045	0,0054	0,0074	0,0094
Ad. S. C. Arroz	0,1957	0,2967	0,4501	0,5551	0,6181
SD	0,0088	0,0052	0,0150	0,0132	0,0108
Sub. C. Vol. 10%	0,1849	0,2692	0,4535	0,5867	0,6578
SD	0,0214	0,0071	0,0440	0,0479	0,0374
Ad. C. Vol. 10%	0,2481	0,4032	0,5800	0,7419	0,8401
SD	0,0155	0,0125	0,0213	0,0253	0,0261
Sub. C. Vol. 30%	0,1584	0,2391	0,3962	0,4784	0,5334
SD	0,0065	0,0213	0,0265	0,0469	0,0254
Ad. C. Vol. 30%	0,2442	0,3439	0,5857	0,7543	0,9039
SD	0,0160	0,0234	0,0528	0,0705	0,1218

7.4.1 Ensaios de absorção capilar

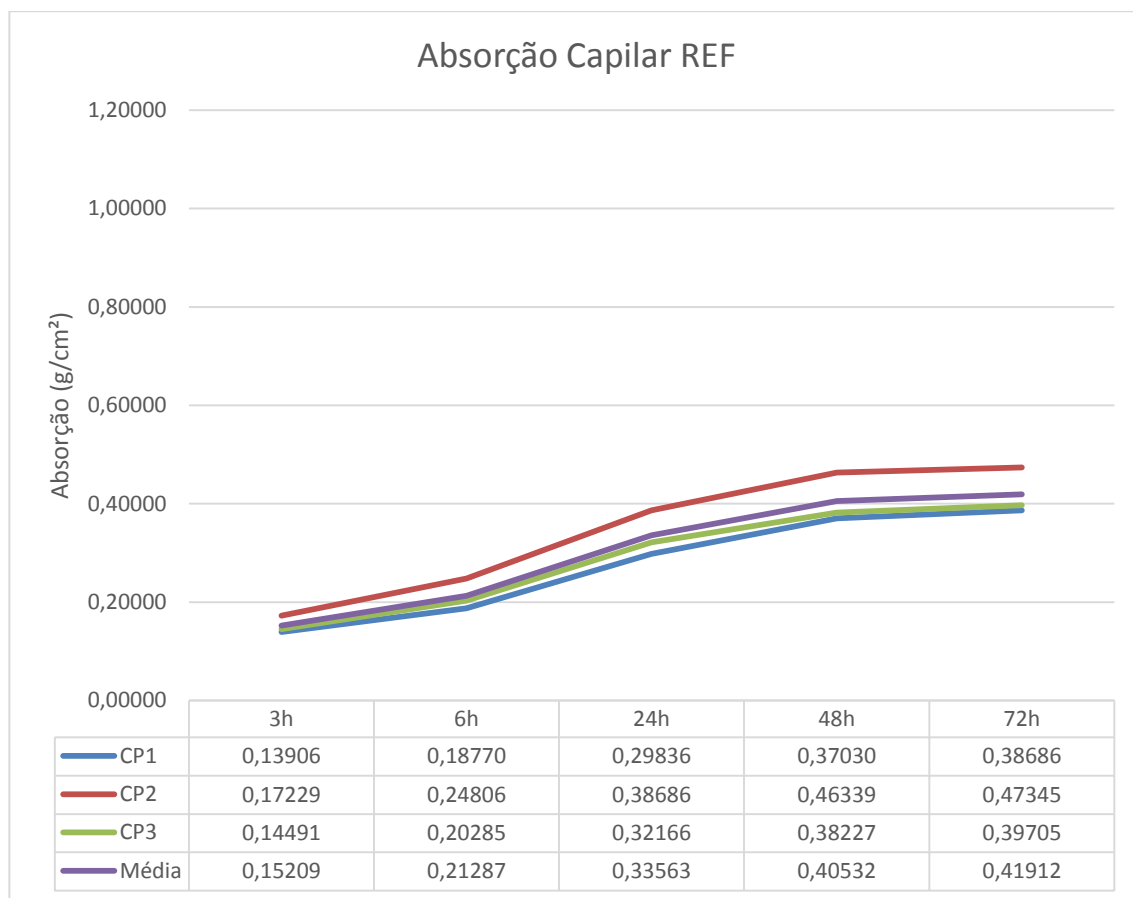


Figura 88 – Absorção Capilar referência

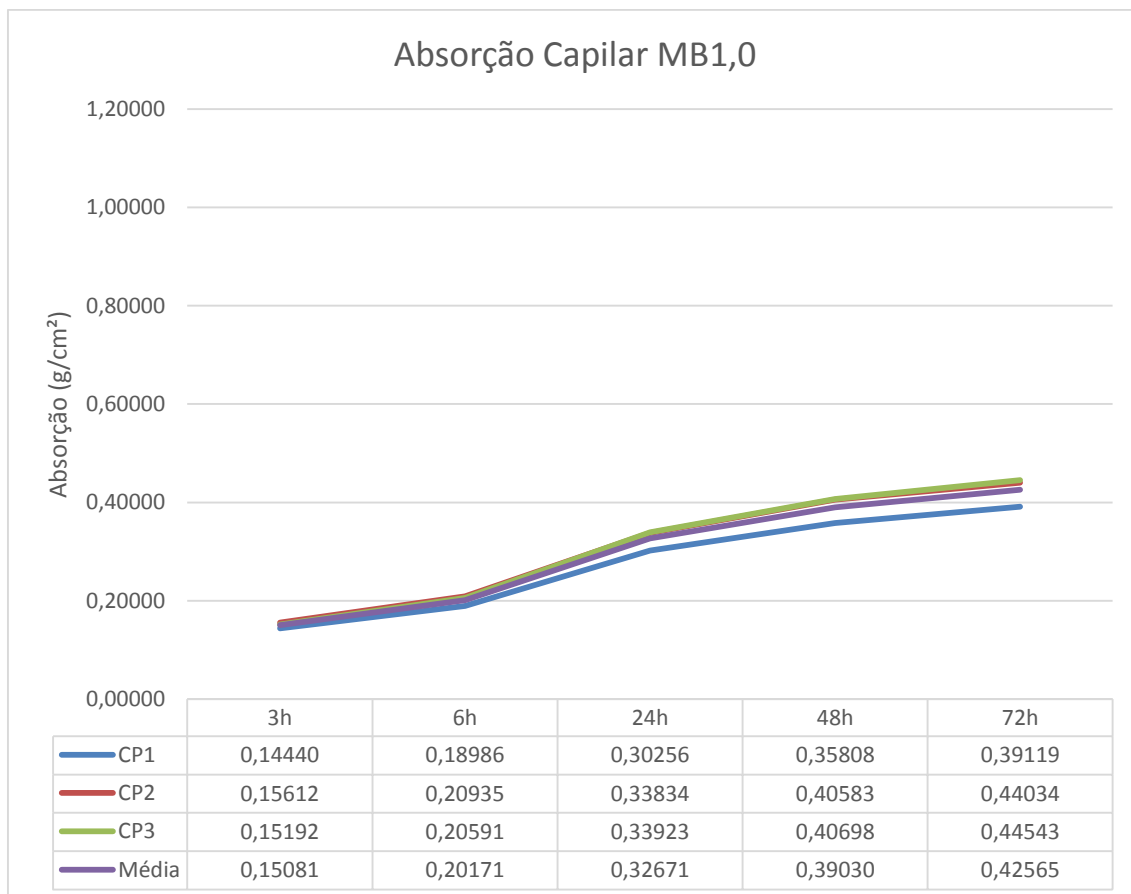


Figura 89 - Absorção Capilar metacaulin



Figura 90 – Absorção capilar adição de metacaulin

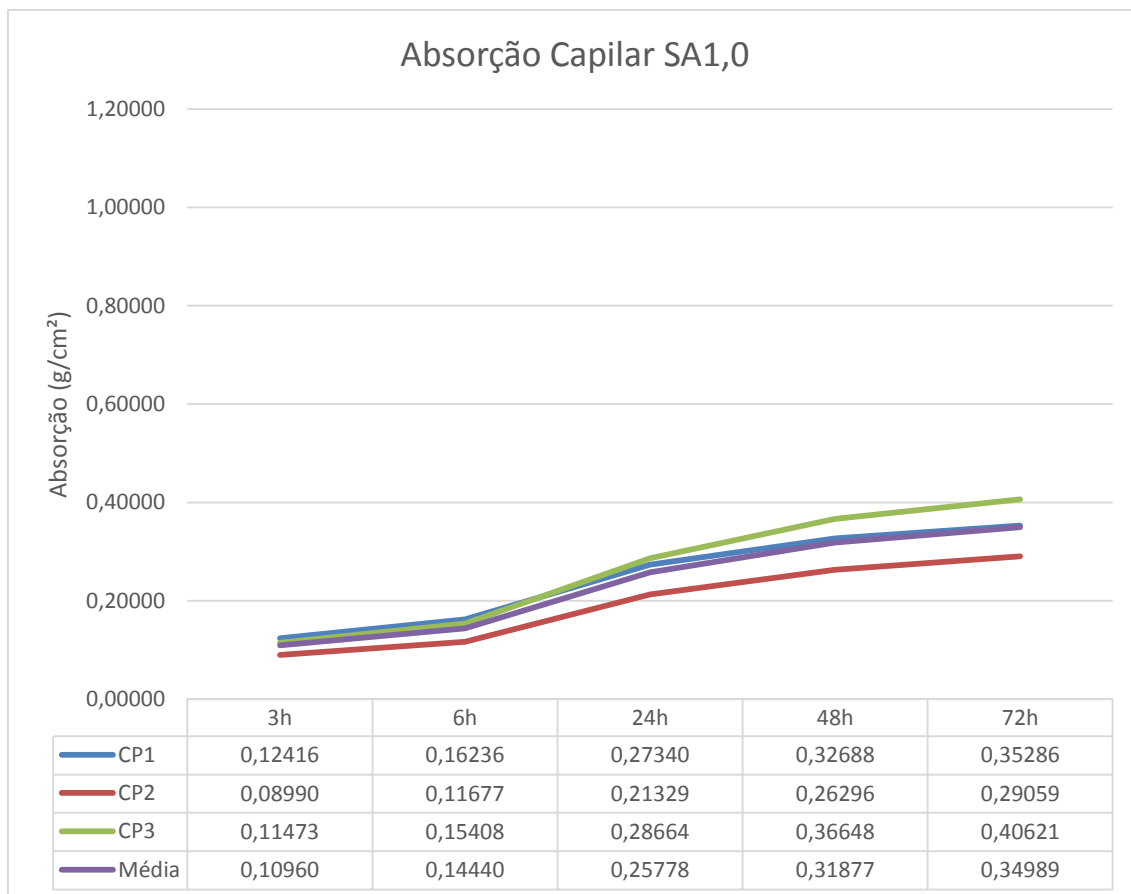


Figura 91 – Absorção capilar sílica ativa substituição

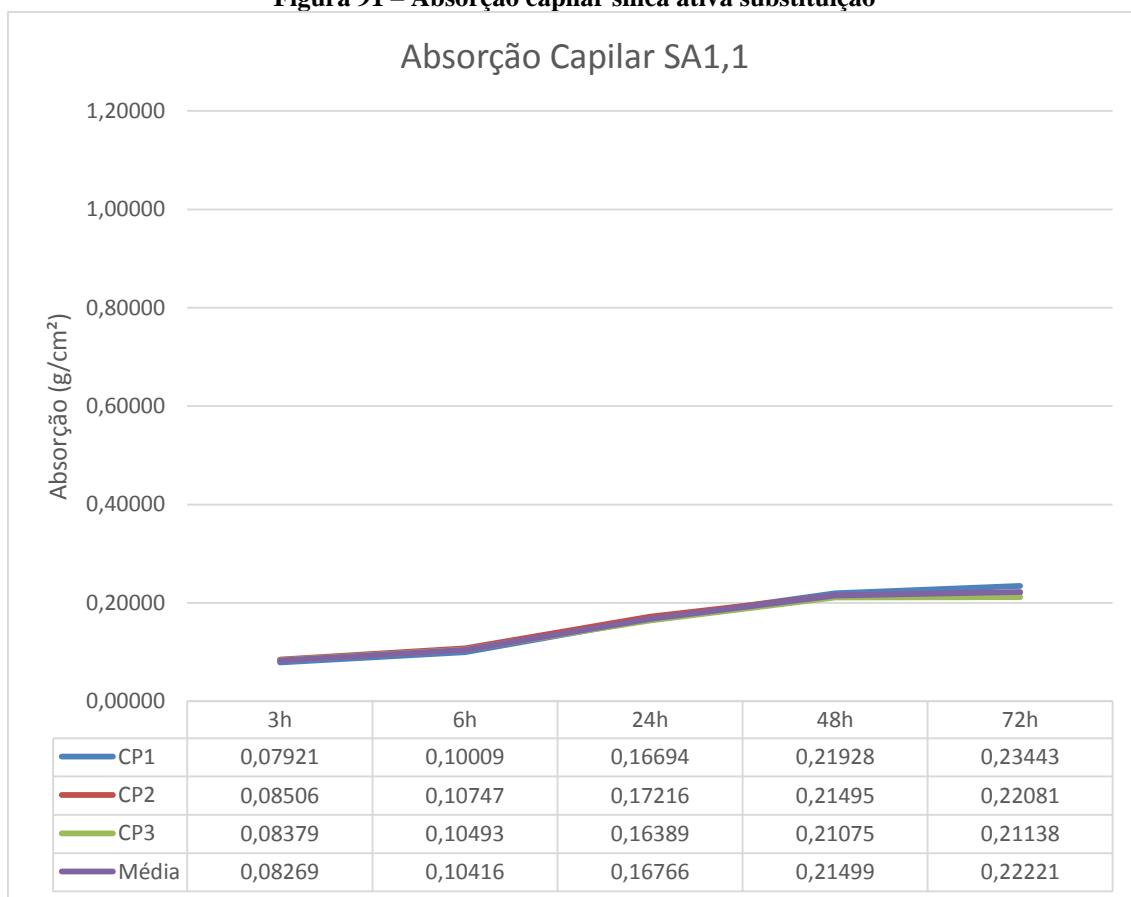


Figura 92 Absorção capilar Sílica Ativa Adição

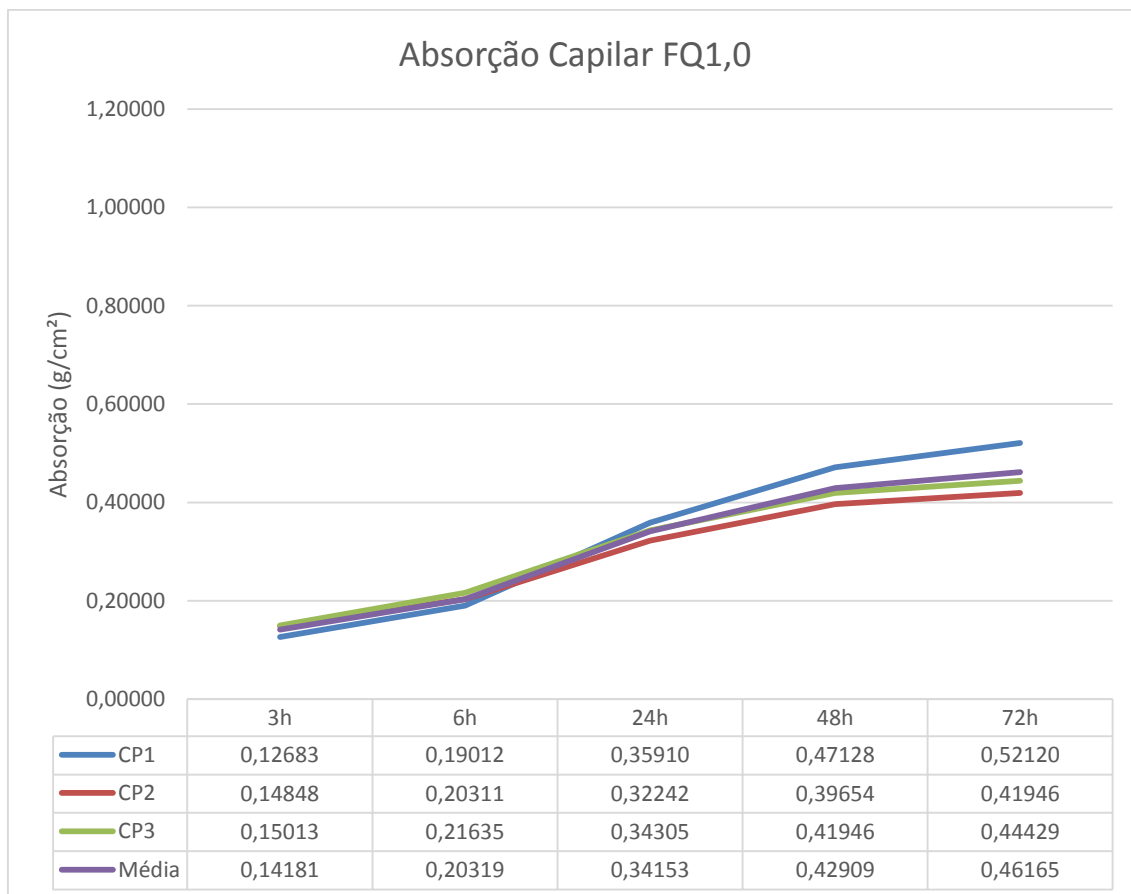


Figura 93 – Absorção capilar Fíler Quartzoso Substituição

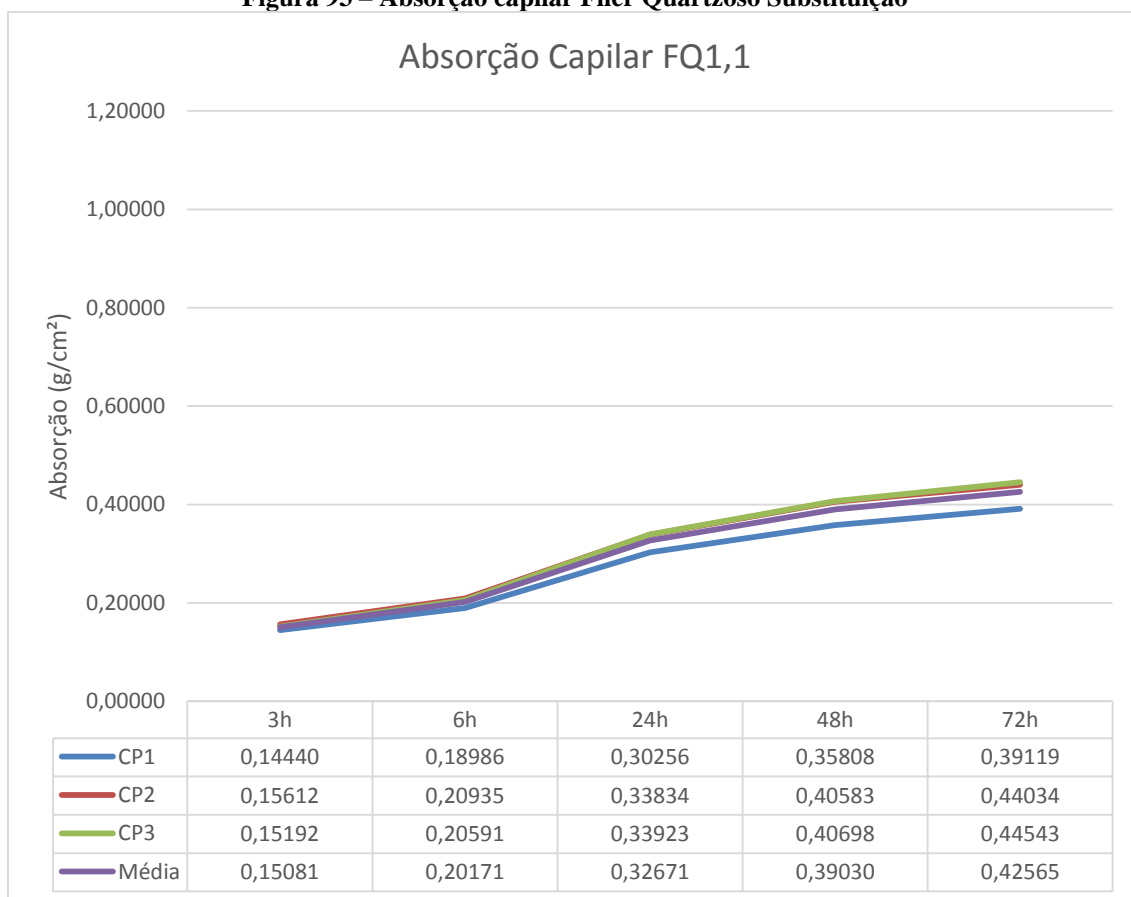


Figura 94 – Absorção capilar Fíler Quartzoso adição

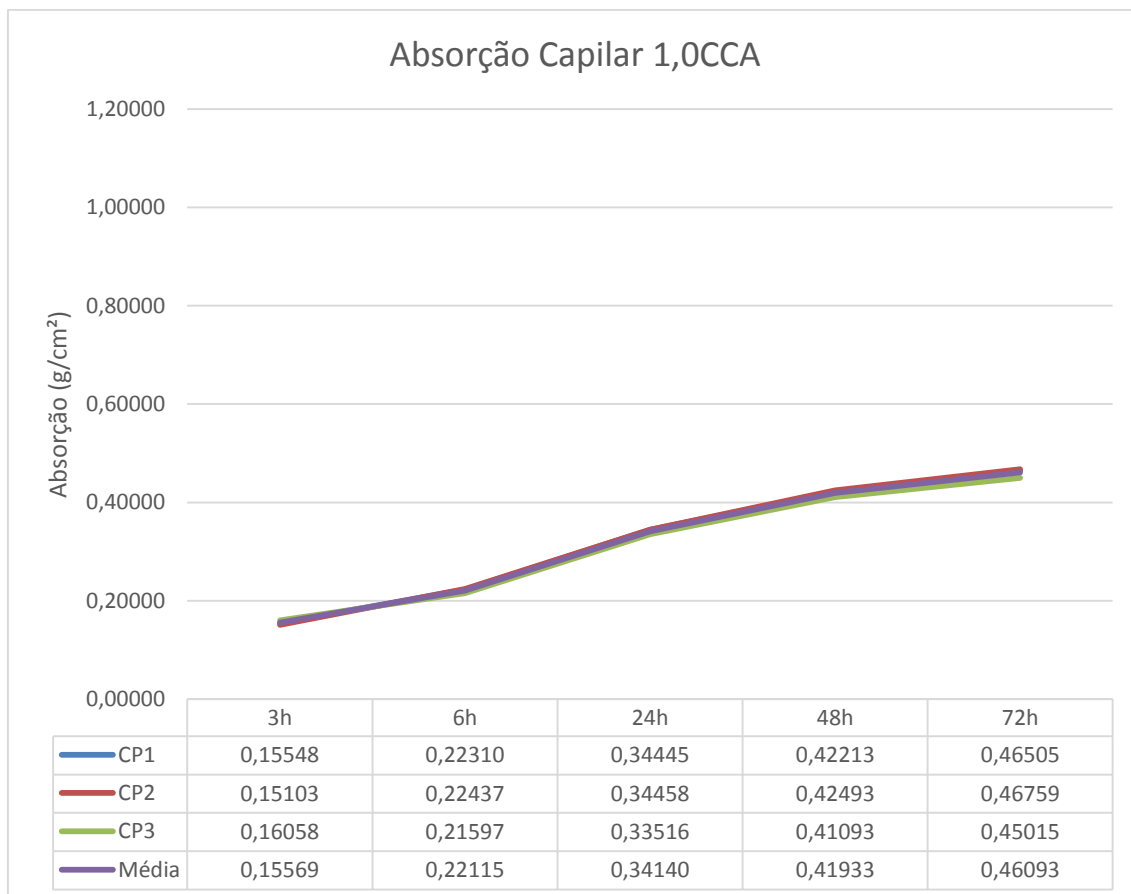


Figura 95 – Absorção capilar Cinza de Casca de Arroz Substituição

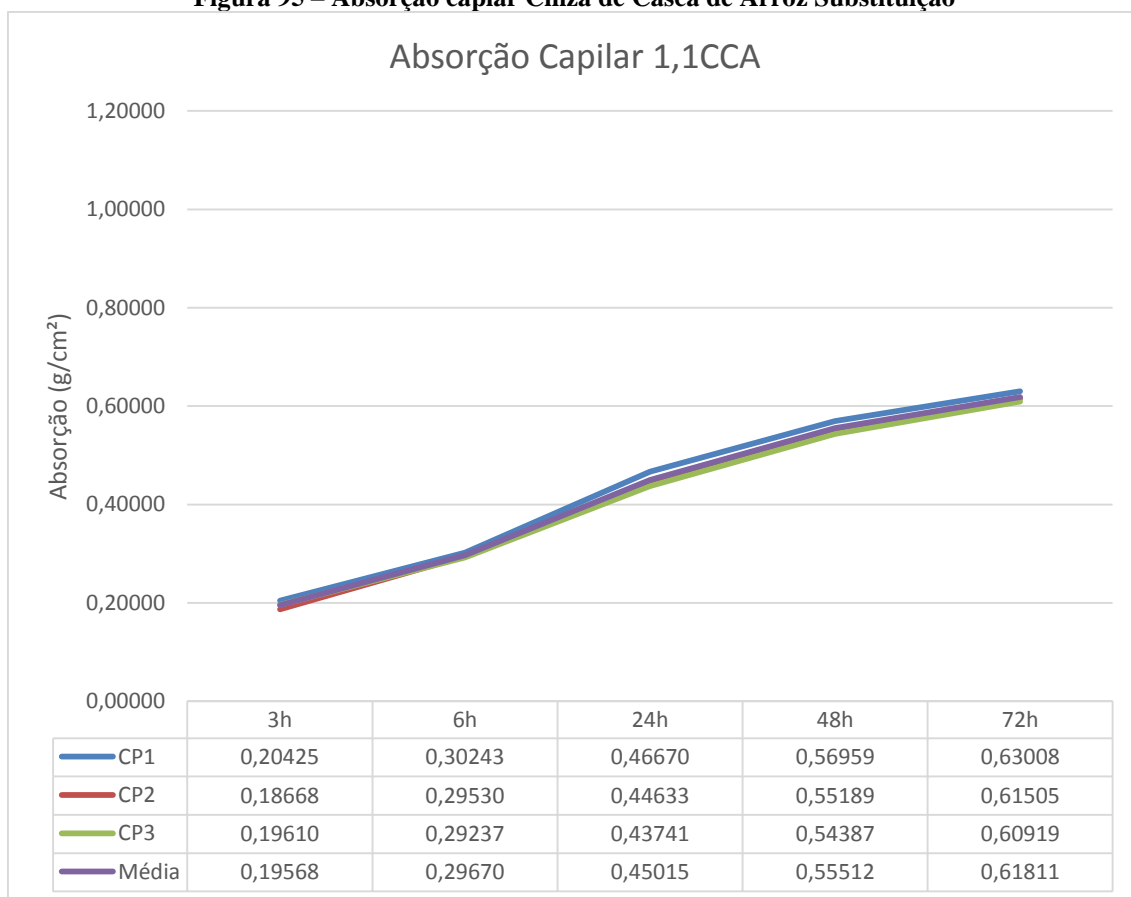


Figura 96 – Absorção capilar Cinza de Casca de Arroz Adição

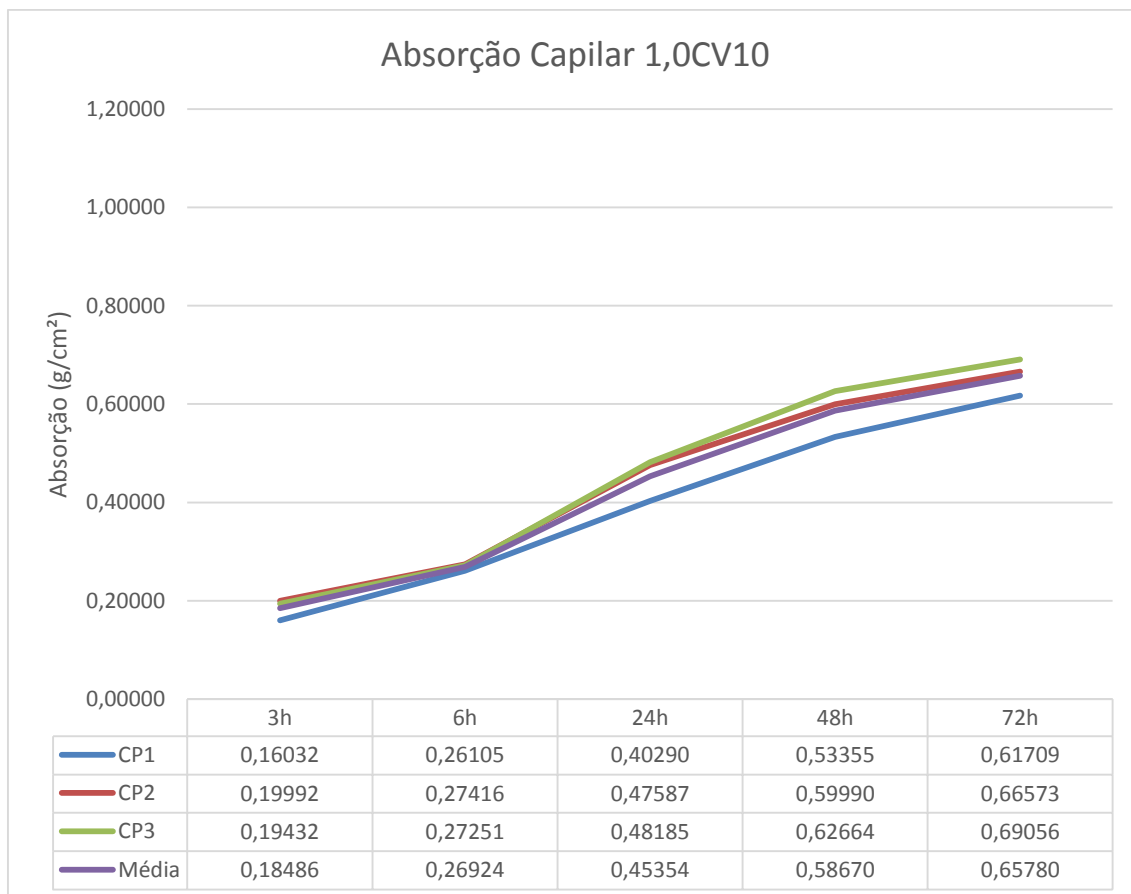


Figura 97 – Absorção Capilar Substituição de 10% de Cinza Volante

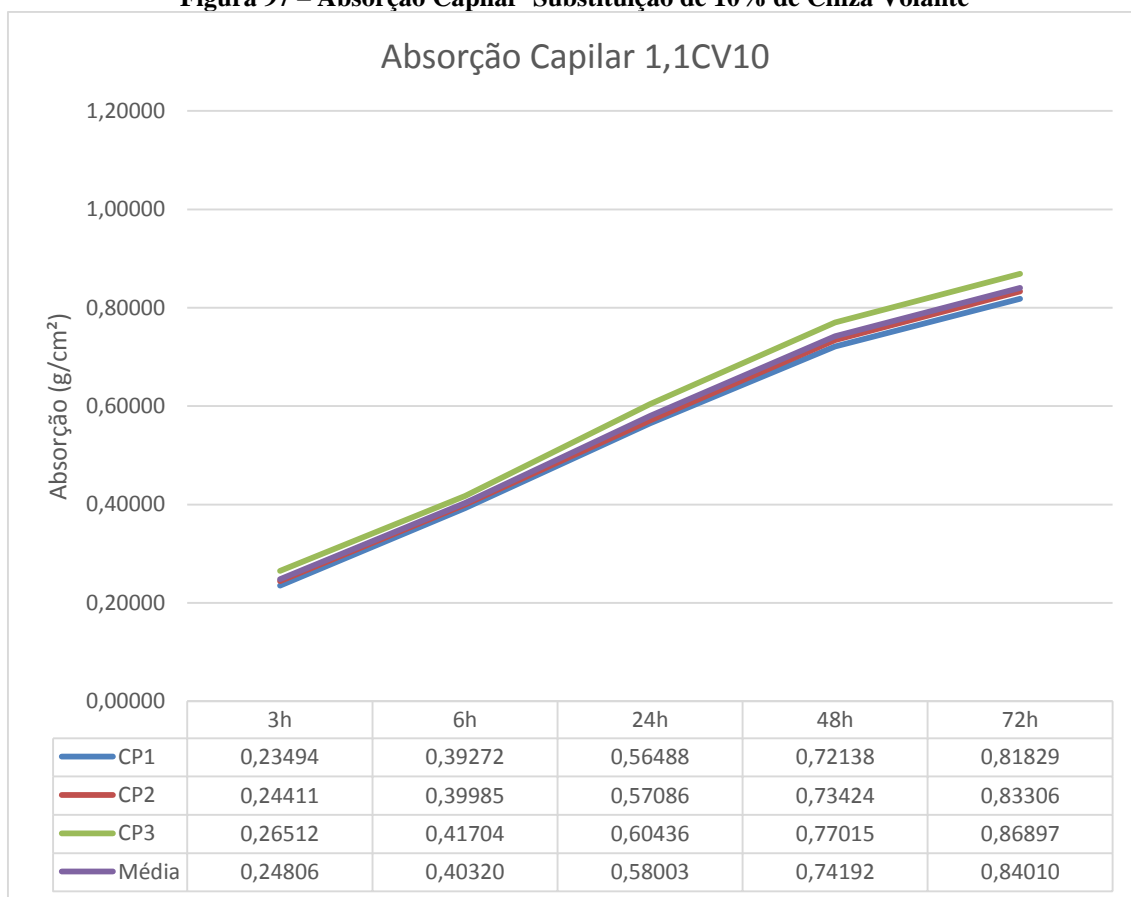


Figura 98 – Absorção Capilar Adição de 10% de Cinza volante

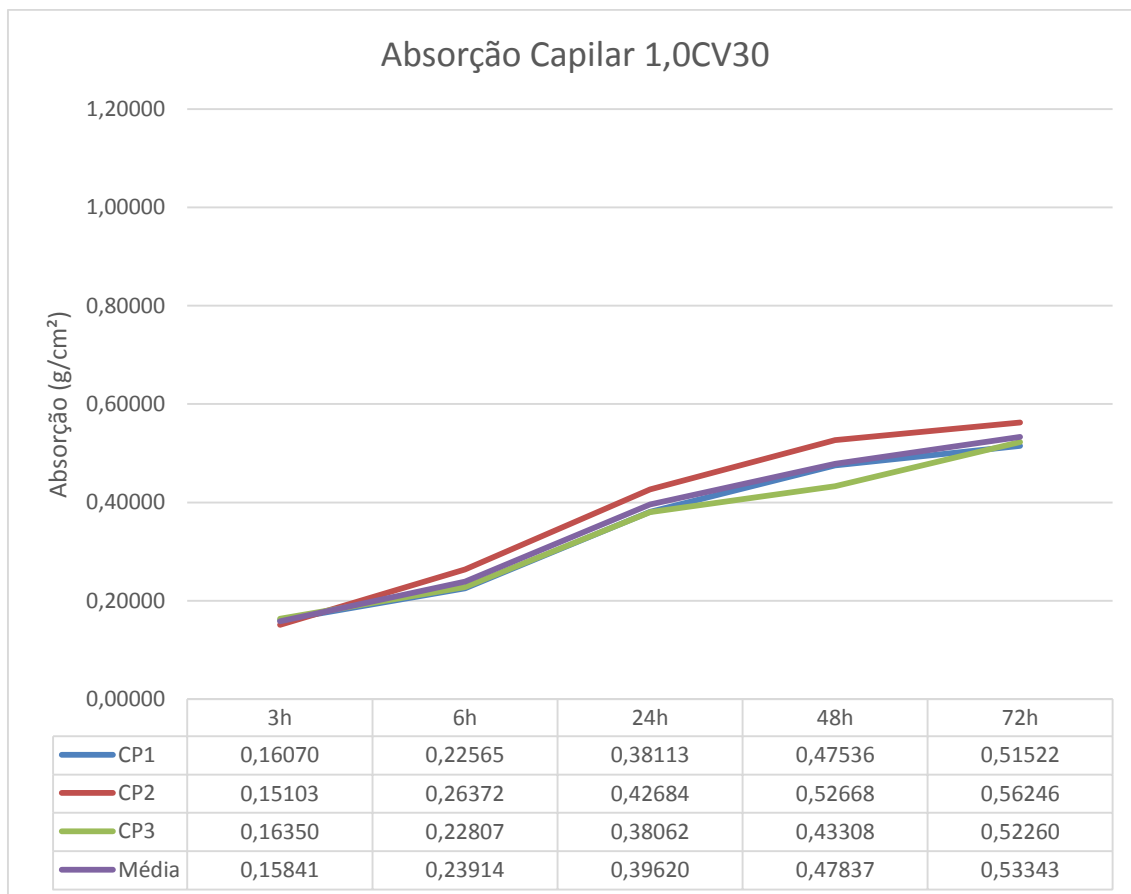


Figura 99 – Absorção Capilar Substituição de 30% de Cinza Volante

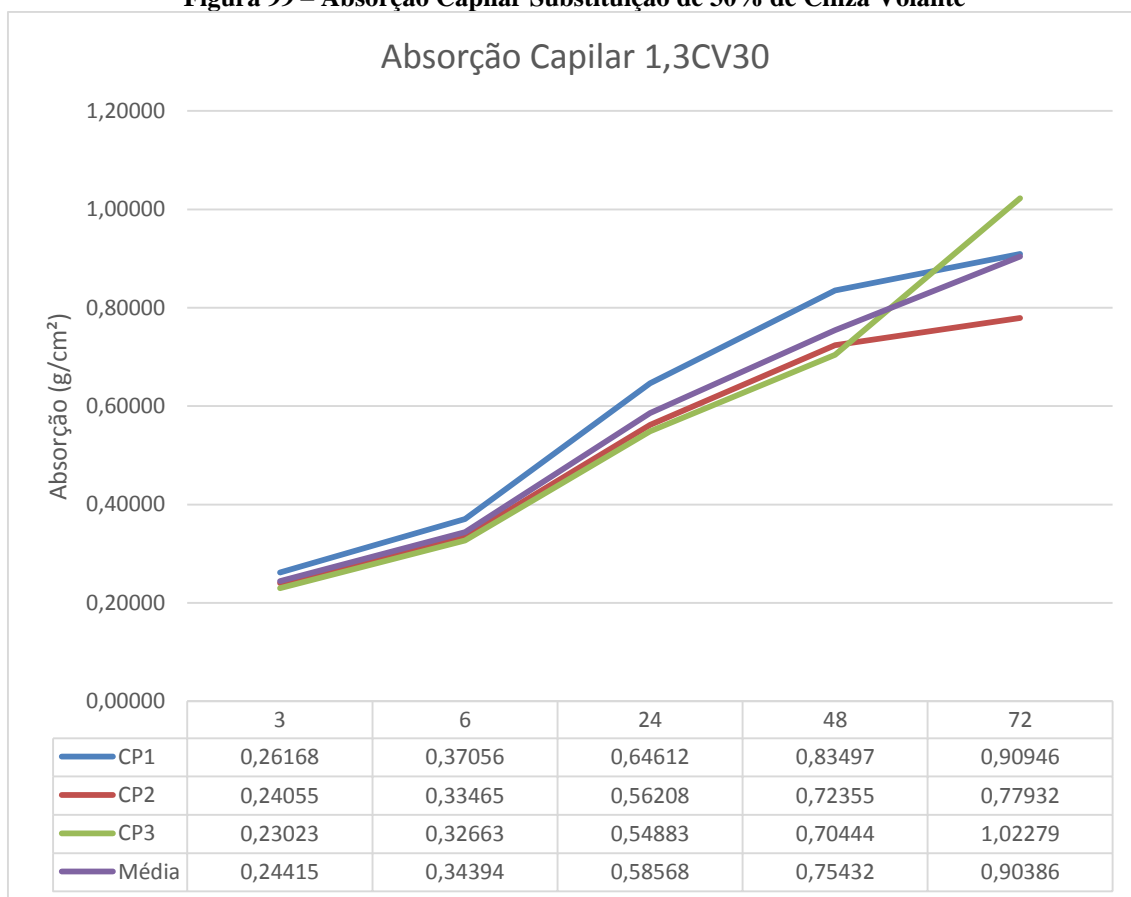


Figura 100 – Absorção Capilar adição de 30% de Cinza Volante

7.5 TESTE TUKEY

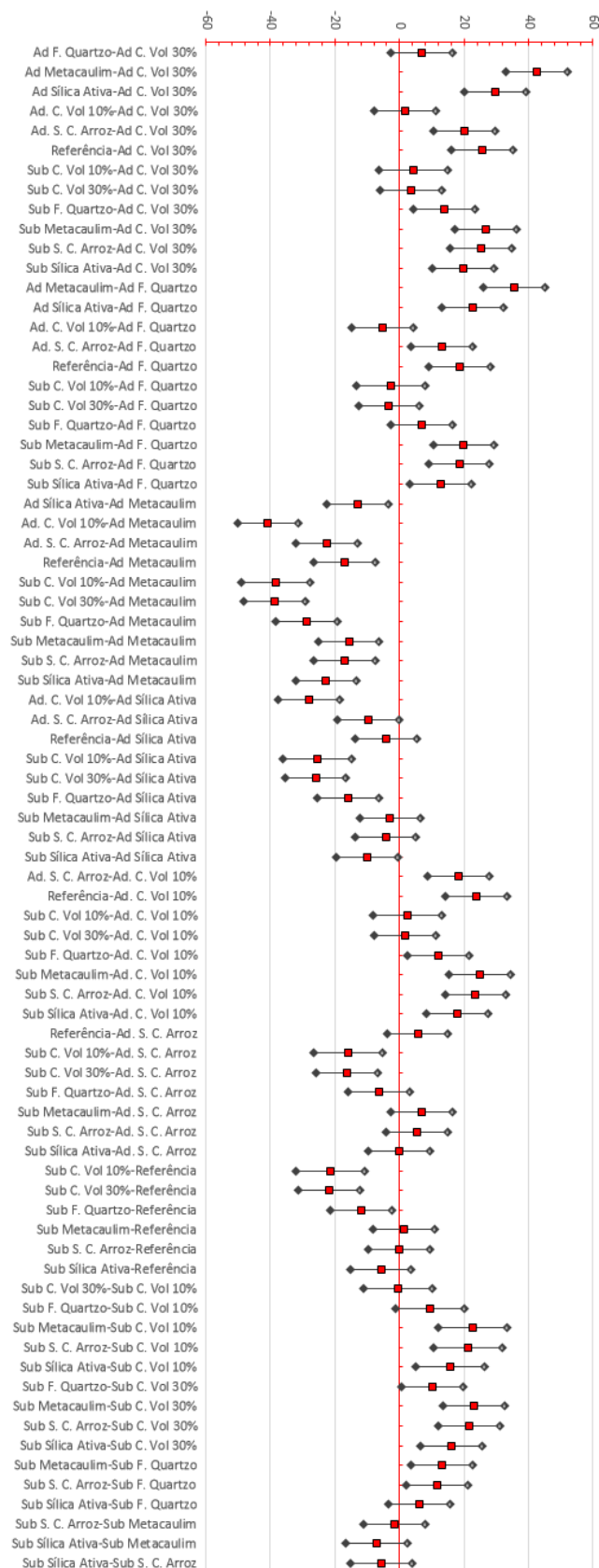


Figura 101 – Teste Tukey geral de resistência a compressão aos 28 dias

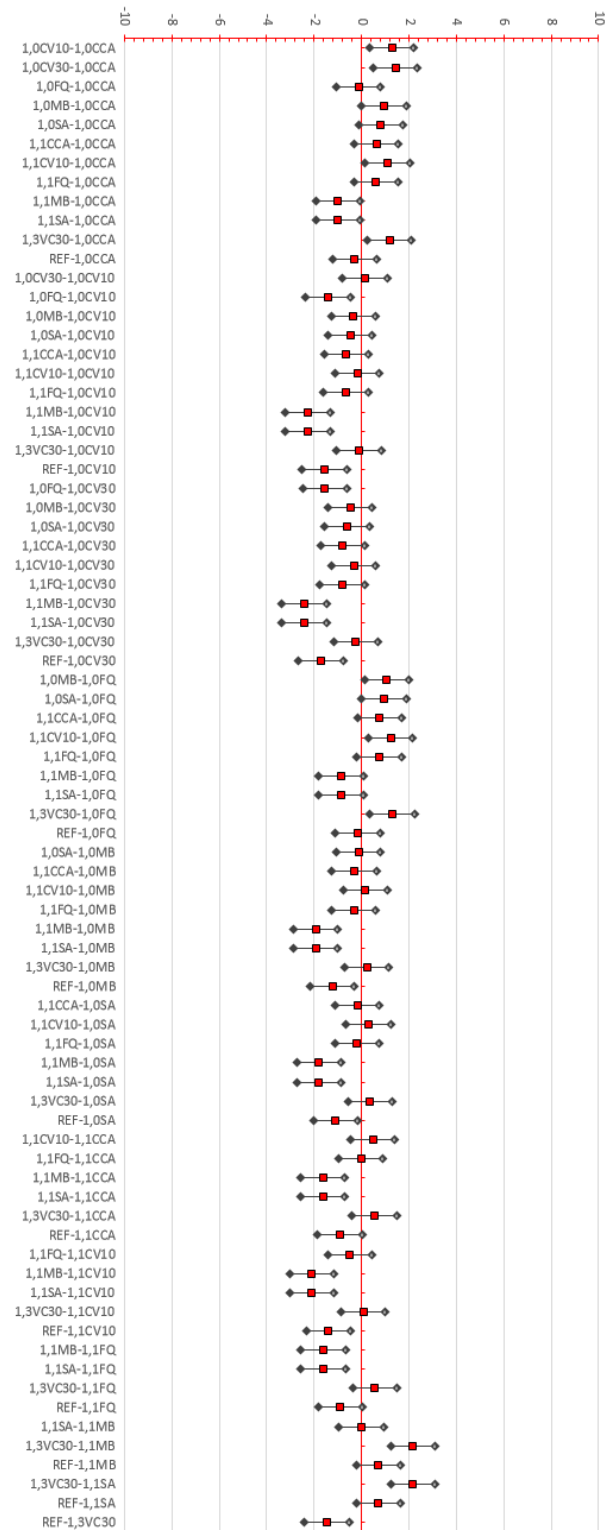


Figura 102 - Teste Tukey para leituras de carbonatação à 1 semanas

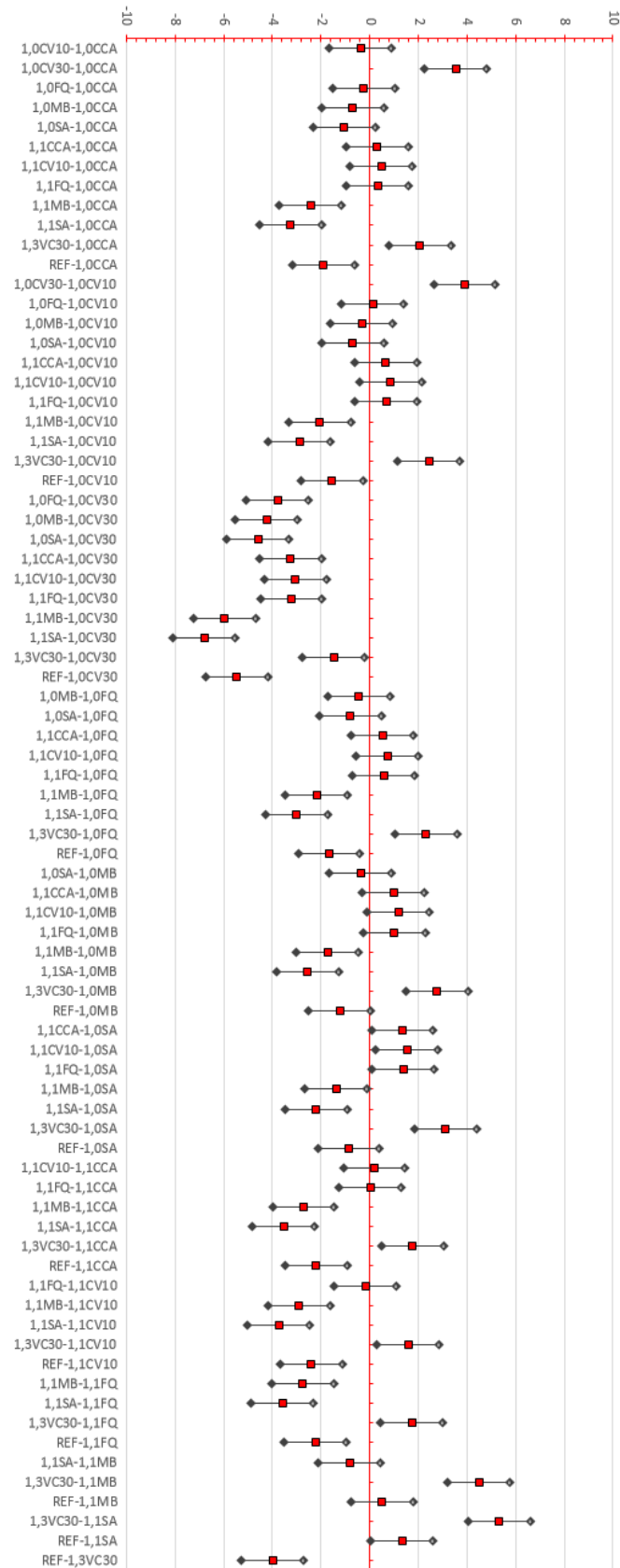


Figura 103 – Teste Tukey para leituras de carbonatação à 4 semanas

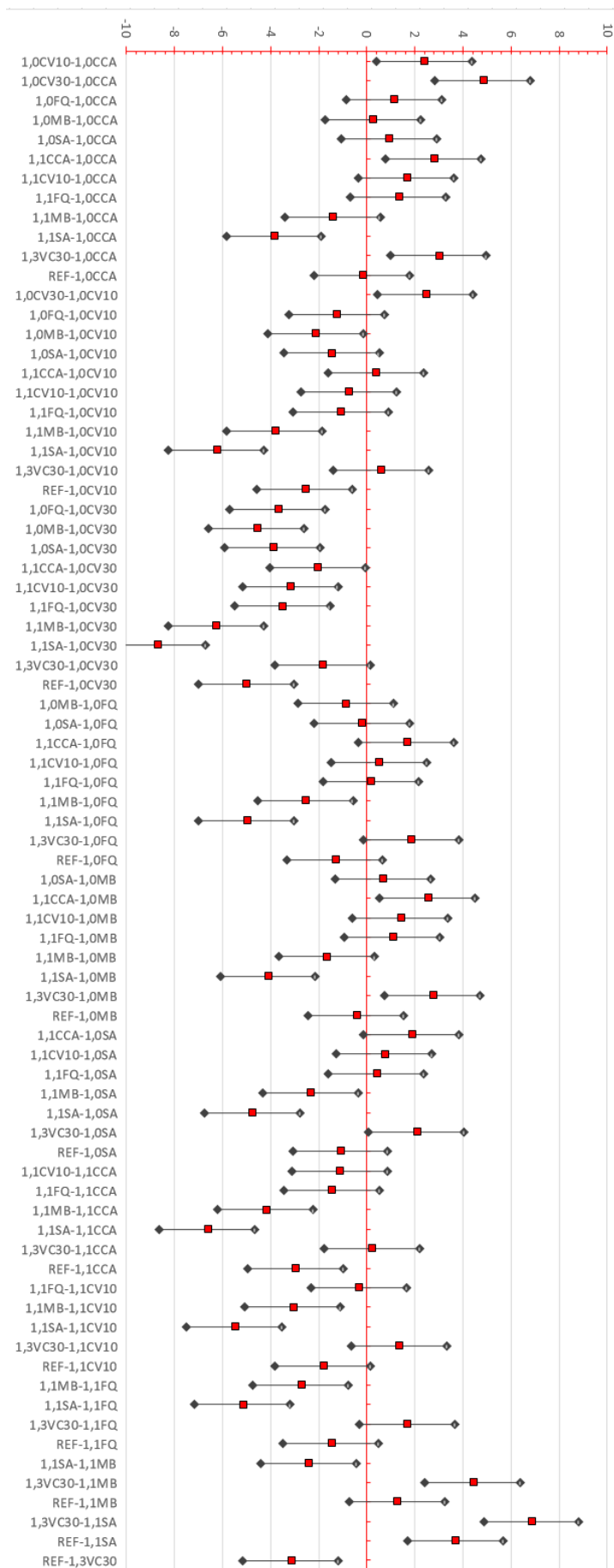


Figura 104 – Teste Tukey para leituras de carbonatação à 8 semanas

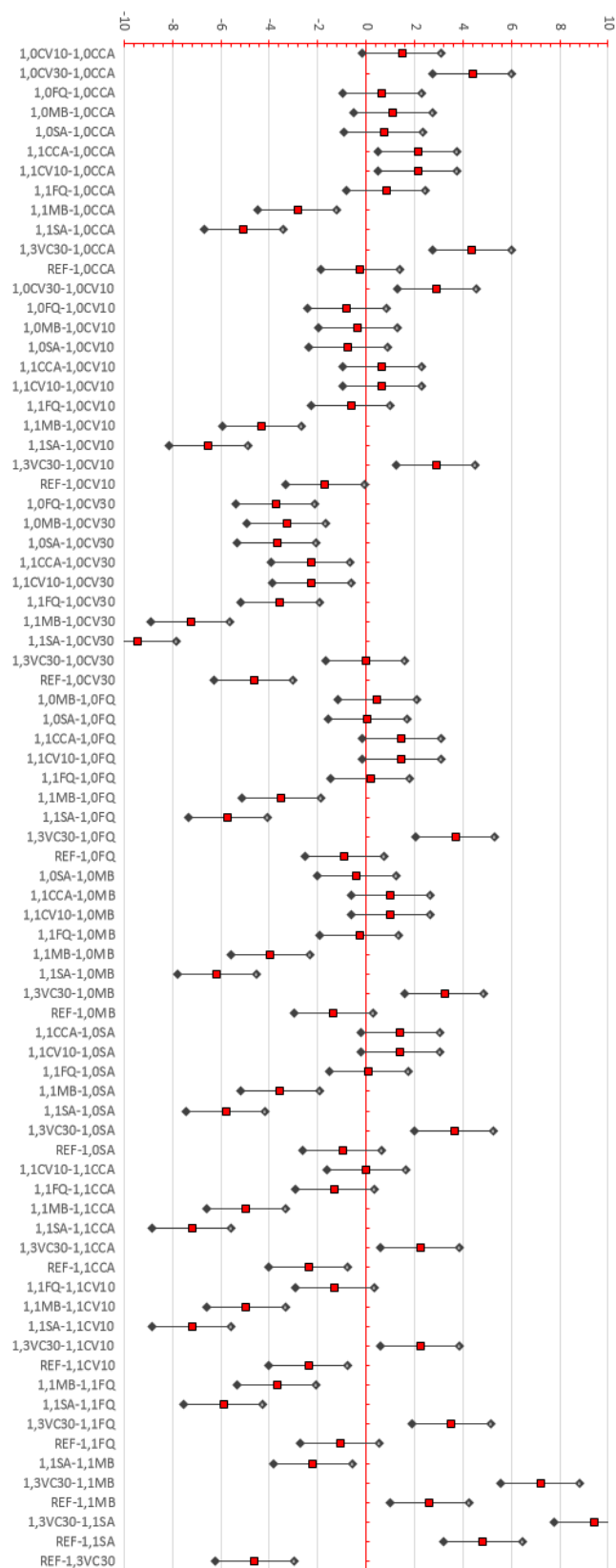


Figura 105 – Teste Tukey para leituras de carbonatação à 12 semanas

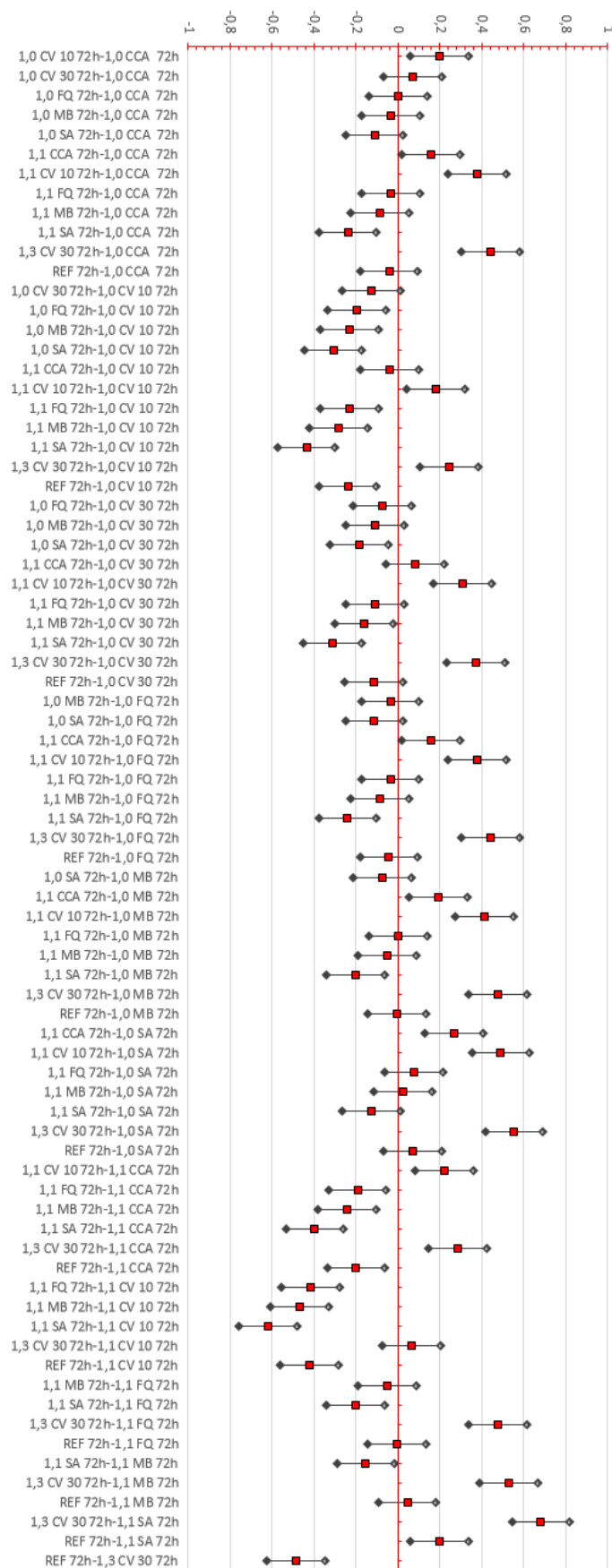


Figura 106 – Teste Tukey da absorção capilar às 72h.